

# GEOTERMIA

REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

*Volumen 23, No. 2*

*Julio-Diciembre de 2010*

## CONTENIDO

<b>Editorial</b>	<b>1</b>
<b>Simulación numérica de la operación de la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.</b>	<b>2</b>
J.I. Martínez-Estrella, A. García-Gutiérrez, A.F. Hernández-Ochoa, M.P. Verma, A. Mendoza-Covarrubias, A. Ruiz-Lemus	
<b>Recuperación secundaria de energía en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC</b>	<b>14</b>
P. Sánchez-Upton, R.A. Sánchez-Velasco, J.A. Frost, y J.S. de León-Vivar	
<b>Cambios geoquímicos en fluidos del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, durante 1997-2007: Identificación de procesos de yacimiento</b>	<b>24</b>
Rosa María Barragán, Eduardo Iglesias, Rodolfo J. Torres, Víctor M. Arellano, Neftalí Reyes-Picasso, Miguel Ramírez, Ruth Tapia, Pedro Hernández	
<b>Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC</b>	<b>33</b>
Álvaro Aguilar Dumas	
<b>Thermo-poroelasticity in geothermics, formulated in four dimensions</b>	<b>41</b>
Mario César Suárez-Arriaga	
<b>Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.</b>	<b>51</b>
Héctor Pérez Esquivias, José Luis Macías Vázquez, Víctor Hugo Garduño Monroy, José Luis Arce Saldaña, Felipe García Tenorio, Renato Castro Govea, Paul Layer, Ricardo Saucedo Girón, Carlos Martínez, Adrián Jiménez Haro, Gabriel Valdés, Lorenzo Meriggi y Ramón Hernández	
<b>Foro</b>	<b>64</b>
<b>El congreso geotérmico mundial 2010 y la Declaración de Bali</b>	<b>65</b>
Luis C.A. Gutiérrez-Negrín	
<b>Nuevo libro sobre modelado de sistemas geotérmicos</b>	<b>71</b>
Luis C.A. Gutiérrez-Negrín	
<b>El Mundo de la Energía</b>	<b>74</b>
Información recopilada por Alfredo Mañón Mercado	

La revista **GEOTERMIA** es un órgano virtual de información técnica publicado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de edición semestral. Su Certificado de Licitud de Título es el número 2784 del 2 de octubre de 1985, y su Licitud de Contenido es el número 2514 del 1 de diciembre de 1986, ambos expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación, México. GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública de México, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos no asume ninguna responsabilidad con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avala ni sugiere el uso de productos comerciales, los cuales son eventualmente citados sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la Comisión Federal de Electricidad corre a cargo de los autores. Las opiniones vertidas son responsabilidad exclusiva de ellos y no reflejan necesariamente las opiniones, políticas o programas oficiales de la Comisión Federal de Electricidad.

### **EDITORES**

**Director:** José Luis Quijano León

**Editor:** Luis C.A. Gutiérrez Negrín

#### **Consejo Editorial:**

Alejandro Becerril Zavala

Magaly Flores Armenta

Raúl Sánchez Velasco

Jaime Vaca Serrano

#### **Editores asociados:**

Víctor Arellano Gómez (IIE)

Víctor Hugo Garduño Monroy (UMSNH)

Susan F. Hodgson (Historiadora de temas geotérmicos y petroleros)

Alfredo Mañón Mercado (Consultor)

José Manuel Romo Jones (CICESE)

Mario César Suárez Arriaga (UMSNH)

#### **Secretaría:**

Enedelia Calderón Ochoa

**Responsable de sitio en página de la UMSNH:**

#### **Oficinas:**

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas

Morelia, Mich., 58290

Tel. (443) 322-7000

Correos: [luis.gutierrez@geotermia.org.mx](mailto:luis.gutierrez@geotermia.org.mx), [l.g.negrin@gmail.com](mailto:l.g.negrin@gmail.com), [luis.quijano@geotermia.org.mx](mailto:luis.quijano@geotermia.org.mx)

## Editorial

Como comentamos en el número anterior, a fines de abril pasado se realizó el Congreso Geotérmico Mundial (World Geothermal Congress) 2010 en Bali, Indonesia. Este evento, que es el más importante foro geotérmico del mundo, ha impuesto varios récords con relación a los congresos previos de 1995, 2000 y 2005, tanto en lo que se refiere al número de participantes como al de trabajos presentados. En la sección Foro se presenta una reseña del mismo, pudiendo concluirse que el congreso fue un fiel reflejo del panorama actual de la industria geotérmica y del nuevo ímpetu que ésta ha venido experimentando a lo largo del último par de años. En la reseña se incluye también la Declaración de Bali, documento formulado y aprobado en la clausura, y que de algún modo resume la postura y esperanzas de los asistentes.

En la parte técnica este número ofrece un par de trabajos sobre los campos geotérmicos de Cerro Prieto, BC, y Los Azufres, Mich., otro sobre el campo de Las Tres Virgenes, BCS, y uno más de aplicación general sobre modelado de yacimientos geotérmicos. El artículo sobre la recuperación de energía secundaria en Cerro Prieto es un trabajo que pese a haber sido preparado en 2007 no ha perdido actualidad y presenta lo que hasta la fecha pudiera ser una opción para aumentar la generación de electricidad en ese campo. Fue presentado originalmente en la II Reunión Interna de Mejora Continua (RIMC), organizada por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE. El otro es más reciente, ya que fue presentado por su autor en la IV RIMC realizada el año pasado, y también ofrece alternativas que vale la pena considerar para mantener la producción de vapor en ese campo, el más importante de México y el segundo más grande del mundo.

Uno de los trabajos sobre Los Azufres, que describe la simulación numérica de la red de vaporductos en este campo, se presentó en el XVI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana, realizado a fines de 2008, con lo que termina la publicación de los principales trabajos que se discutieron en ese congreso. El otro, preparado por un equipo multidisciplinario de la CFE, los institutos de Geología y de Geofísica de la UNAM, de la Universidad Michoacana y de la de Fairbanks, muestra los resultados de un exhaustivo estudio vulcanológico y estructural realizado en este campo y sus alrededores, y permite concluir que en definitiva no hay evidencias para sustentar la existencia de una caldera volcánica en la zona, antigua controversia geológica, pero con implicaciones prácticas, que finalmente parece cerrarse. Este trabajo se presentó también en la IV RIMC.

El artículo sobre la evolución química observada en los fluidos del campo geotérmico de Las Tres Virgenes, fue presentado en el XVII Congreso Anual de la AGM, realizado en noviembre de 2009 en Morelia, lo mismo que el trabajo sobre la termo-poroelasticidad en rocas de yacimientos geotérmicos. El autor de este último es al mismo tiempo uno de los dos coautores del nuevo libro sobre modelado geotérmico que reseñamos en el Foro, y así los lectores interesados en el tema pueden conocer otra fuente de información. Con esos dos artículos empezamos la publicación de los trabajos más relevantes que se presentaron en el más reciente congreso de la AGM.

Complementa el Foro la sección permanente de El Mundo de la Energía, pero también vale la pena destacar el anuncio sobre el XVIII Congreso Anual de la AGM, incluido en la página 73, el cual está programado para celebrarse en octubre de 2010, al cual desde luego invitamos a nuestros lectores. Vale la pena comentar que en la Asamblea General programada para la misma fecha, la AGM habrá de elegir a su nuevo consejo directivo.

**Luis C.A. Gutiérrez-Negrín**

# Simulación numérica de la operación de la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

*J.I. Martínez-Estrella<sup>1</sup>, A. García-Gutiérrez<sup>1</sup>, A.F. Hernández-Ochoa<sup>1</sup>, M.P. Verma<sup>1</sup>, A. Mendoza-Covarrubias<sup>2</sup>, A. Ruiz-Lemus<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, Morelos, CP 62490, México. Correo: [jime@iee.org.mx](mailto:jime@iee.org.mx). <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México.

---

## Resumen

El sistema de transporte de vapor del campo geotérmico de Los Azufres está constituido por una red de 28 km de ductos de 10 a 42 pulgadas de diámetro que captan el vapor de 41 pozos productores y lo conducen hacia 12 unidades generadoras que, en conjunto, totalizan una capacidad instalada de 188 MWe. La extensión y complejidad geométrica y operativa de la red hacen del análisis del transporte del vapor a través de ella una tarea sumamente complicada. Esto motivó la realización de un estudio consistente en el desarrollo de un modelo hidráulico y la simulación numérica de la operación de la red, cuyos resultados se presentan aquí. La simulación se llevó a cabo empleando dos simuladores disponibles comercialmente. Los resultados de simulación del comportamiento global de la red bajo el escenario operativo seleccionado para este estudio, arrojaron diferencias relativas promedio menores al 10% entre presiones medidas y simuladas en los pozos, y entre los flujos medidos y simulados en las plantas, para los dos simuladores utilizados. Estos resultados se consideran altamente satisfactorios y permiten demostrar que el modelo hidráulico desarrollado es una herramienta confiable para el estudio del transporte de vapor en la red, ya sea en forma integral o parcial y bajo diferentes condiciones operativas, actuales o contempladas a futuro, además de que también permitieron identificar áreas de oportunidad para mejorar la operación del sistema.

*Palabras clave:* Red de transporte de vapor, simulación numérica, campo geotérmico Los Azufres, modelo hidráulico.

## Numerical simulation of the operation of the steam supply network in Los Azufres geothermal field, Mich.

### Abstract

The steam transportation system at Los Azufres geothermal field includes a network 28 km long of pipes 10" to 42" in diameter, carrying steam produced from 41 wells to 12 power plants of varying capacities—yielding a total installed capacity of 188 MWe. The length and geometrical and operative complexities of the pipe network complicate any analysis of steam transported through the system. Therefore we have developed a hydraulic model and a numerical simulation of network operations and the results are presented here. Two commercially-available simulators were used. Simulation results for the whole network, under operative settings selected for this study, show mean relative differences below 10% --when comparing measured and simulated pressures in the wells, and measured and calculated flow-rates in the power plants for both simulators. The results, considered satisfactory, demonstrate how a developed hydraulic model is a useful and reliable tool for studying steam transport throughout a network under different operating conditions. In addition, areas were identified for improving network operations.

*Keywords:* Steam transport network, numerical simulation, Los Azufres geothermal field, hydraulic model.

---

---

## 1. Introducción

En campos geotérmicos el vapor producido por los pozos es transportado hacia las plantas generadoras a través de una serie de tuberías conectadas que, comúnmente, constituyen una red compleja de varios kilómetros de longitud, donde las caídas de presión y de temperatura pueden ser llegar a ser muy altas. Esto hace muy difícil la predicción de cambios en la presión o en el flujo ocasionados por la operación del sistema debido a eventos como la apertura o cierre de válvulas, la integración de nuevos pozos o la salida de operación de las plantas por labores de mantenimiento. Por este motivo, el modelado y la simulación numérica de la red de transporte de vapor representa una alternativa muy útil para conocer las condiciones de operación en prácticamente cualquier punto de la red, lo cual sería muy difícil de obtener de manera experimental ya que los ductos de vapor son considerados como contenedores de alta presión.

En la literatura existen pocos trabajos relacionados con el modelado de flujo en redes y líneas de vapor en campos geotérmicos. Entre ellos se pueden mencionar los de Marconcini y Neri (1979), Huang y Freeston (1992; 1993) y Di Maria (2000) quienes empleando diferentes métodos y códigos simulaban redes pequeñas de 4 a 6 pozos. Betaggl y Bidini (1996) desarrollaron un código que simuló el flujo del vapor desde el pozo hasta las turbinas en una red de 32 pozos y tres turbinas. En México, la UNAM (1990) desarrolló un modelo matemático de la red de vaporductos de Cerro Prieto el cual resolvió la ecuación de cantidad de movimiento considerando flujo adiabático, sin estimar perfiles de temperatura ni flujo de condensado en purgas. Peña (1986) y Peña y Campbell (1988) desarrollaron para este mismo campo un modelo basado en la expansión politrópica del vapor a medida que fluye en una red horizontal de tuberías aisladas térmicamente en el que incluyeron como ejemplos ductos de 427 m de longitud. En los años recientes el IIE (García *et al.*, 2006; 2007a; 2007b) desarrolló un modelo hidráulico y llevó a cabo la simulación numérica de la red de vaporductos de Cerro Prieto, la cual incluyó 162 pozos integrados, empleando el simulador de flujo Pipephase, y el cual constituye el estudio más extenso reportado en la literatura abierta.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un modelo hidráulico para la red de vaporductos del campo geotérmico Los Azufres y se presentan los resultados de simulación correspondiente a la operación de la red de transporte de vapor para una fecha en particular, empleando para tal fin dos simuladores comercialmente disponibles que permitieron la validación del modelo.

## 2. Objetivo

El objetivo primordial de este estudio fue desarrollar un modelo computacional que represente de manera apropiada los procesos de pérdidas de presión y calor asociadas con el transporte de vapor a través de la red de vaporductos, y que permita determinar las condiciones de operación en cualquier punto de la misma, de manera que aporte elementos de información adecuados para hacer un uso más eficiente del vapor y garantizar el suministro oportuno a las plantas generadoras. Adicionalmente, el modelo debe permitir evaluar el comportamiento de la red a través de la simulación numérica de diferentes escenarios relacionados con cambios en la operación y el crecimiento de la red de vaporductos.

## 3. Descripción de la red de vaporductos

El campo geotérmico de Los Azufres (CGLA) se localiza en la parte central de México, a 250 km al oeste de la ciudad de México y a 90 km al noreste de la ciudad de Morelia, Michoacán, dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Mexicano. El CGLA se encuentra dividido en dos zonas bien definidas: Marítaro en el Norte y Tejamaniles en el Sur, ambas separadas por una distancia de varios kilómetros.

En el CGLA actualmente operan 14 unidades generadoras de diversos tipos y capacidades, que en conjunto integran una capacidad total instalada de 188 MWe. Las unidades incluyen cinco plantas de flasheo simple, una de 50 MWe y cuatro de 25 MWe cada una; siete plantas de 5 MWe de tipo contrapresión; y dos plantas de ciclo binario de 1.5 MWe cada una. En la Zona Norte se encuentran instaladas siete plantas cuya capacidad instalada es de 95 MWe, mientras que en la Zona Sur operan otras siete plantas con una capacidad instalada de 93 MWe.

Un total de 41 pozos geotérmicos productores integrados, 23 en la Zona Norte y 18 en la Zona Sur, suministran el vapor requerido por las 14 plantas geotérmicas. Este vapor es transportado a través de una red de vaporductos cuya longitud total aproximada es de 28 km, de los cuales 15.15 km (54.3%) corresponden a la Zona Norte y 12.75 km (45.7%) a la Zona Sur. Los vaporductos tienen diámetros que varían de 10 a 42" y están térmicamente aislados con una capa de material fabricado a base de lana mineral o fibra de vidrio, y con una cubierta exterior de aluminio o hierro galvanizado.

La red posee diversas interconexiones entre vaporductos, colectores y ramales, lo cual posibilita enviar el vapor hacia diferentes sectores de la red con el fin de asegurar un suministro eficiente de vapor a las plantas de generación. El flujo de vapor hacia las plantas y entre las diversas interconexiones, es controlado mediante una serie de válvulas de compuerta y de mariposa instaladas en diferentes puntos de la red.

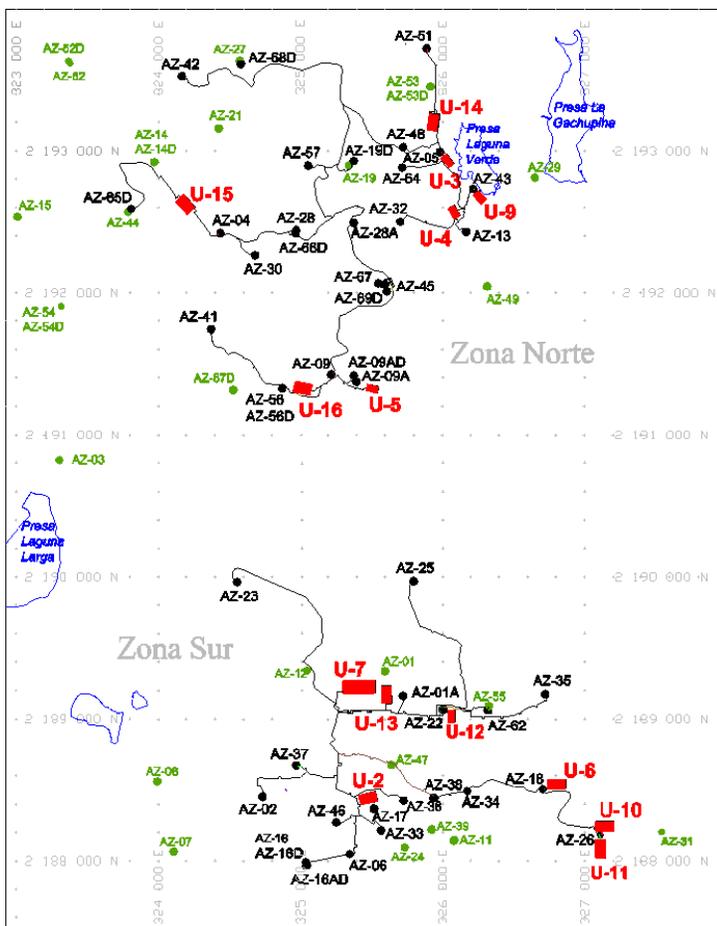


Fig. 1. Red de vaporductos del campo geotérmico Los Azufres.

topográficos y orto-fotos digitales del CGLA. A partir de la revisión de esta información se obtuvieron los datos primarios requeridos para iniciar la construcción del modelo de la red tales como: geometría, materiales, accesorios, interconexiones, aislantes, etc. En los casos donde se encontró información no

La Figura 1 muestra la red de vaporductos del CGLA. Como se observa, el sistema consiste en realidad de dos redes, una ubicada en la Zona Norte y la otra en la Zona Sur, las cuales operan de manera totalmente independiente. De acuerdo a esta consideración, el modelo de la red de transporte de vapor del CGLA se dividió igualmente en dos partes correspondientes a cada zona del campo.

#### 4. Metodología

La metodología seguida en el desarrollo del estudio incluyó: (a) Datos de entrada; (b) Documentación del modelo de la red; (c) Descripción de los simuladores utilizados; (d) Selección del método de caída de presión utilizado para las simulaciones; y (e) Simulación de escenarios.

##### a) Datos de entrada

Para el desarrollo del modelo hidráulico se recopiló primeramente la información disponible en los archivos de CFE relacionada con la red de transporte de vapor, la cual incluyó planos y diagramas de diseño y construcción de los vaporductos, mapas

actualizada o faltante, ésta se obtuvo a través de levantamientos directos en campo, lo cual resultó una tarea complicada debido a la complejidad geométrica de la red y a las características topográficas y de vegetación del CGLA.

Para el manejo y procesamiento de toda la información, esta se compiló en tablas de MS Excel con el propósito de facilitar la realización de cálculos trigonométricos de manera automatizada, con los cuales se construyeron perfiles de elevación o topográficos detallados para cada vaporducto. A partir de estos perfiles se obtuvieron los datos de entrada requeridos por el simulador numérico tales como longitudes reales de tuberías, diferencias de elevación y valores de ángulos de codos y vueltas. Este proceso permitió también identificar todos los nodos de interconexión existentes en la red, así como la secuencia de todos los accesorios de flujo (tuberías, accesorios y equipo adicional) conectados en cada tramo de vaporducto (*link*) para toda la red. Adicionalmente, una nomenclatura específica fue creada para la identificación de cada ducto de la red, lo cual facilitó el manejo de la enorme cantidad de datos generados.

**b) Documentación del modelo de la red**

Una vez generada la información de entrada para el modelo, se documentó en formatos diseñados específicamente para este propósito. Estos formatos son tablas de MS Word que incluyen los tipos, dimensiones y cédulas de cada tubo, válvula u otro accesorio incluido en un tramo de vaporducto o *link* (Figura 2). Los formatos incluyen además un croquis de localización, el perfil de elevación y referencias de la(s) fuente(s) de información para cada vaporducto documentado con fines de rastreabilidad de cada dato de entrada. El diseño de los formatos está basado en la ventana de captura de datos de entrada de la interfaz de usuario del simulador Pipephase, lo cual facilitó la implementación del modelo dentro de los dos simuladores utilizados.

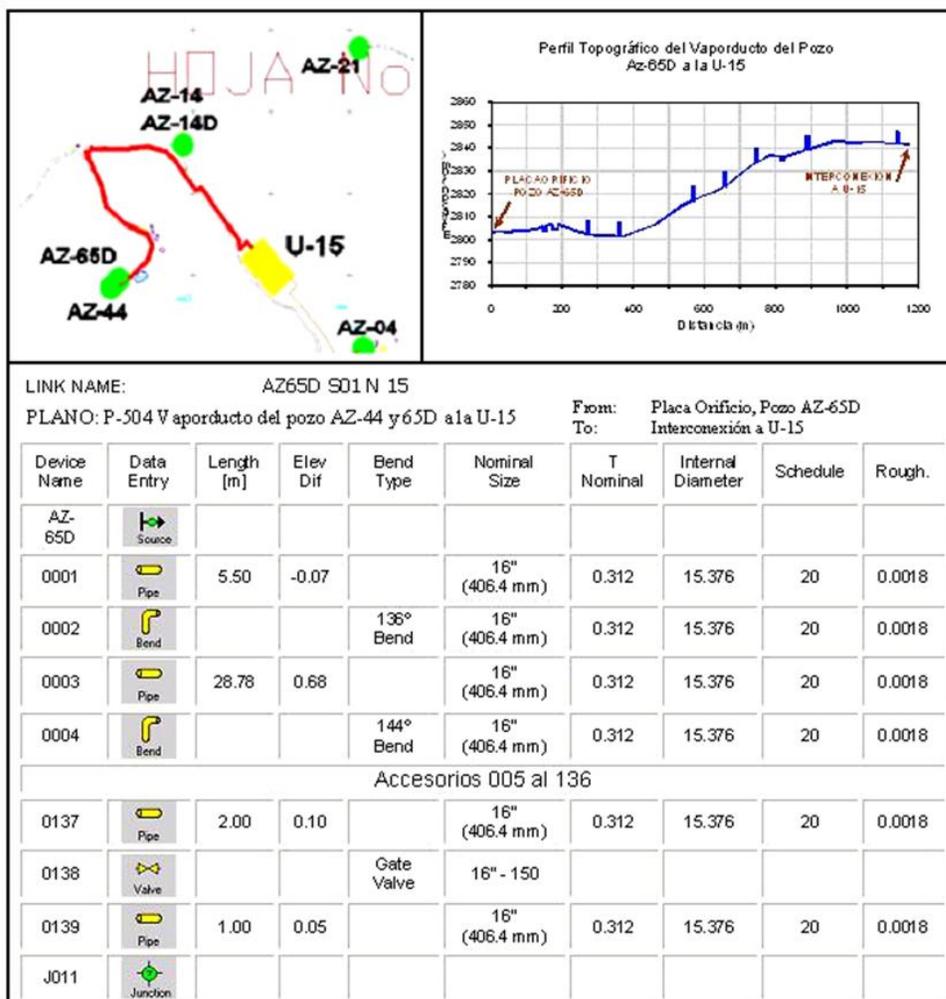


Fig. 2. Ejemplo de formato de documentación del modelo de la red de vaporductos del CGLA.

**c) Descripción de los simuladores utilizados**

Para la simulación numérica del modelo de red se utilizaron los simuladores de flujo Pipephase v.9.1 (Invensys, 2005a; 2005b) y Sim.Snet (TS&E, 2005), ambos disponibles de manera comercial. Pipephase es

un simulador de flujo multifásico en estado estacionario que permite simular pozos, tuberías y redes de tuberías, tanto para el transporte de hidrocarburos como de agua y vapor. Este simulador cuenta con una interfaz gráfica de usuario que facilita la construcción de modelos y el análisis de resultados, además de contar con un módulo para optimización de flujo. Sim.Snet (Steam Transmission Network Simulator) es un simulador de transporte de vapor que integra pozos, tuberías, yacimientos y plantas generadoras, y calcula presión, temperatura, flujo másico, entalpía, pérdidas de calor y condensado en cada nodo o segmento de tubería. A diferencia de Pipephase, Sim.Snet cuenta únicamente con un módulo de pre-procesamiento que hace uso de una hoja de MS Excel para crear archivos de entrada.

Debido a su capacidad, Pipephase se utilizó en este estudio para facilitar la implementación del modelo de la red de transporte de vapor y el análisis de los resultados de simulación; sin embargo, sólo puede usarse mediante un esquema de renta que resulta muy costoso. Sim.Snet, en cambio, fue adquirido de manera permanente por CFE y, como se describe más adelante, proporciona resultados comparables a los obtenidos con Pipephase, no obstante su formulación de una fase.

#### d) Selección del método de cálculo de caída de presión

Con el fin de seleccionar el método de cálculo de caída de presión más adecuado para simular la red de vaporductos del CGLA, tomando en cuenta su topografía montañosa, se realizaron mediciones puntuales de presión a lo largo del colector principal de 42" de diámetro que conduce vapor hacia la unidad U-7 de 50 MWe en la Zona Sur del CGLA, utilizando un manómetro calibrado y un transductor de presión.

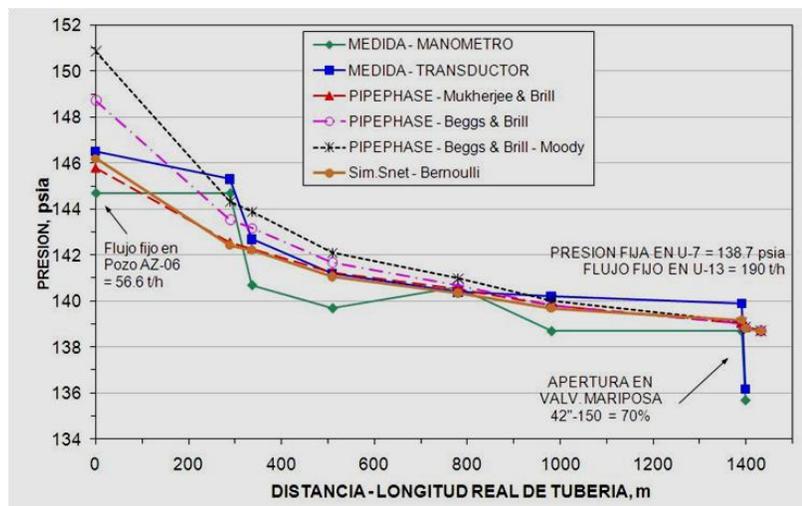


Fig. 3. Ajuste de datos de presión medidos en el Colector Principal de la Zona Sur con tres métodos de cálculo de caída de presión incluidos en el simulador Pipephase.

simuladas con Sim.Snet con las presiones medidas en campo; se observa que el ajuste es equiparable con el obtenido empleando el método de Mukherjee en Pipephase.

#### e) Simulación de escenarios

Para la validación del modelo de red del CGLA se determinó llevar a cabo la simulación numérica de la operación global de la red de transporte de vapor con el fin de analizar su comportamiento haciendo uso de información operativa correspondiente a una fecha en específico. Como se comentó anteriormente, el modelo de red se constituye por dos sub-modelos, Zona Norte y Zona Sur, razón por la cual las simulaciones se corrieron de manera separada para cada zona.

La Figura 3 muestra una comparación de las presiones simuladas empleando diferentes correlaciones de flujo incluidas en el simulador Pipephase y datos operativos de la fecha en que se efectuaron las mediciones. En la gráfica se observa que el método de Mukherjee (1979) fue el que mejor se ajustó a las presiones medidas en campo, por lo cual esta correlación fue la que se seleccionó para ser utilizada en la simulación de toda la red de transporte de vapor.

En el caso de Sim.Snet, este simulador solamente utiliza la ecuación de Bernoulli para determinar la caída de presión a lo largo de las tuberías. La Figura 3 incluye también la comparación de las presiones

Una vez definido el escenario a simular, se procedió a implementar los modelos de red dentro de los dos simuladores de flujo. Después, con base en los datos de producción disponibles para la fecha a simular, se introdujeron los datos de entrada (condiciones de frontera) en los nodos correspondientes a pozos (fuentes) y puntos de entrega-recepción en plantas (sumideros) y se procedió a “desconectar” aquellos pozos, válvulas, vaporductos o tramos completos de la red que se encontraban fuera de operación de acuerdo a la “conectividad” de la red definida a partir de la información operativa.

Las Figuras 4 y 5 muestran los esquemas de las subredes de las zonas Norte y Sur, respectivamente, tal y como se observan en la interfaz gráfica de usuario del simulador Pipephase. En ambos diagramas se indican (en color gris) tanto los pozos como los vaporductos deshabilitados. De esta manera quedaron definidas subredes más pequeñas dentro de cada zona, las cuales también operaron de forma independiente una de la otra.

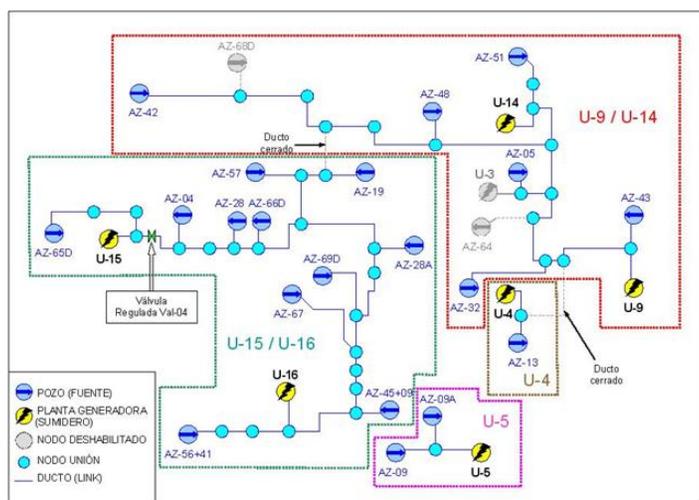


Fig. 4. Diagrama del modelo de red de vaporductos de la Zona Norte del CGLA.

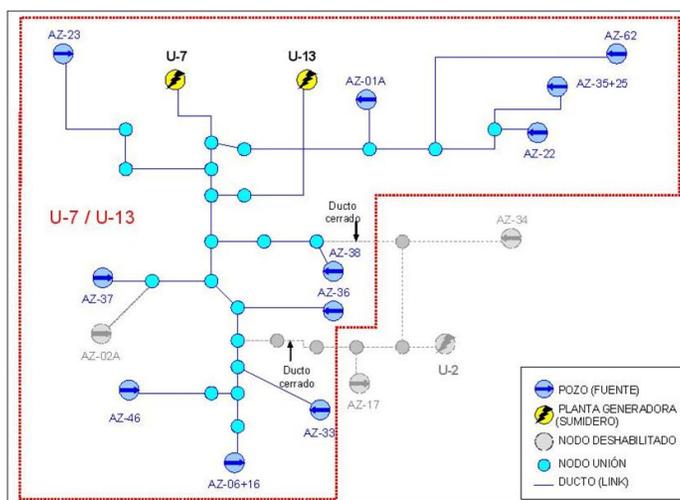


Fig. 5. Diagrama del modelo de red de vaporductos de la Zona Sur del CGLA.

Así, en la Zona Norte quedaron definidas cuatro subredes: la de mayor tamaño transporta vapor a las unidades U-15 y U-16 (ambas de 25 MWe); la segunda envía vapor a las plantas U-14 (25 MWe) y U-9 (5 MWe); una tercera de menor tamaño alimenta a la unidad U-5, y la cuarta, la más pequeña, suministra vapor hacia la planta U-4 (5 MWe).

En la Zona Sur se definió una subred que colecta vapor de la mayoría de los pozos de esta zona y lo envía hacia las unidades U-7 (50 MWe) y U-13 (25 MWe). Otras tres pequeñas subredes que llevan vapor hacia las plantas U-2, U-6 y U-10 (de 5 MWe cada una), respectivamente, no se incluyeron en la simulación (aunque sí en el modelo) por la razón de que en el modelo sus nodos de inicio y final se encuentran separados por una distancia muy corta originando que sus condiciones de frontera sean prácticamente las mismas, lo cual hace irrelevante su cálculo.

Cabe mencionar que este esquema operativo y de conectividad se utilizó para los dos simuladores de flujo empleados, de manera que los resultados de ambos, mismos que se presentan a continuación, pudieran ser comparados.

## 5. Resultados

Los resultados de la simulación se presentan con relación a los datos operativos de la red de transporte de vapor para la fecha especificada y de manera separada para las dos zonas o redes que constituyen el CGLA. Se describen tanto los obtenidos con el simulador Pipephase como con el simulador Sim.Snet y al final se hace una comparación entre los resultados de ambos códigos.

### Zona Norte

En la Figura 6a se presenta una comparación de las presiones medidas y calculadas con el simulador Pipephase para los pozos de la Zona Norte del CGLA. Los resultados concuerdan con los datos medidos con una diferencia relativa promedio de 2.42%, y una desviación estándar de 4.03. En la gráfica se observan dos pozos ligeramente más alejados de la línea de 45° (Az-67 y Az-69D) con diferencias relativas máximas de 10% y 13%, respectivamente. Estos dos pozos se ubican en una zona de “transición” entre un área de pozos con alta presión (180-190 psia) y otra con menor presión (140-150 psia).

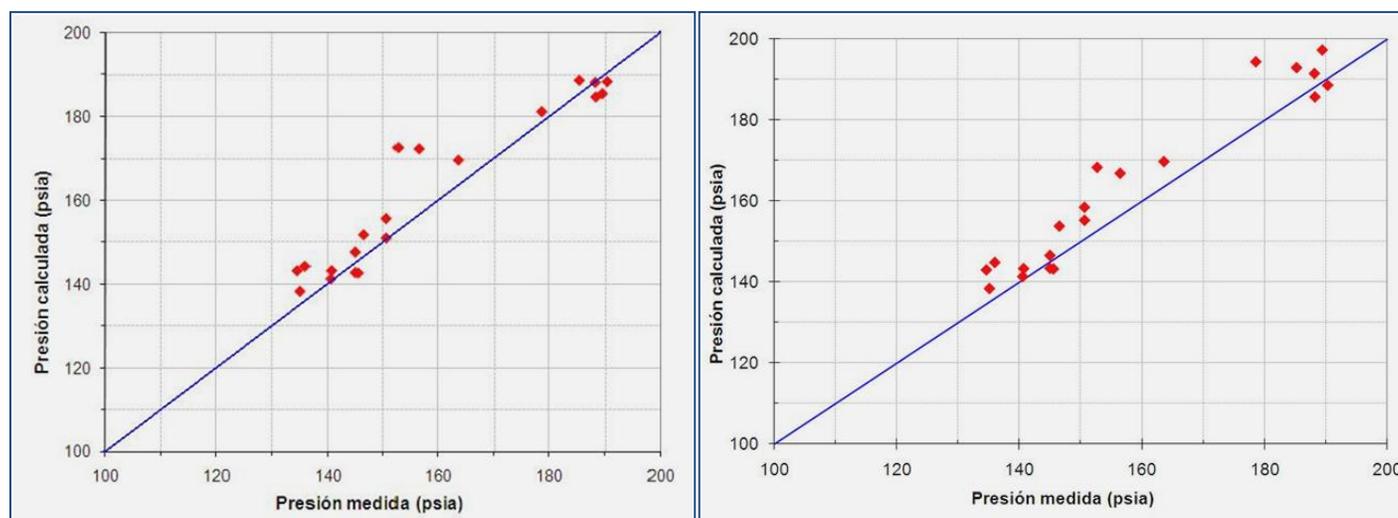


Fig. 6. Comparación de presiones medidas y calculadas en pozos de la Zona Norte del CGLA, con Pipephase (6a: izquierda) y con Sim.Snet (6b: derecha).

La Figura 6b presenta una comparación de las presiones medidas y calculadas con el simulador Sim.Snet en los pozos de la Zona Norte. Los valores calculados se desvían en un 3.31 % en promedio con respecto a los valores medidos, mostrando una desviación estándar de 3.38. Los cálculos que muestran una mayor desviación son para los pozos Az-69D y Az-28A, con diferencias relativas de 10.2 y 8.9%, respectivamente.

Unidad	Gasto medido t/h	Gasto calculado t/h	Diferencia Relativa (%)	Calidad %	Gasto calculado t/h	Diferencia Relativa (%)	Calidad %
		Pipephase			Sim.Snet		
U-4	61.80	67.91	9.88	99.86	67.88	9.84	N.D.
U-5	68.80	69.23	0.63	99.90	68.79	-0.01	N.D.
U-9	68.10	63.80	-6.31	99.78	68.39	0.43	N.D.
U-14	184.00	188.69	2.55	98.50	184.32	0.17	N.D.
U-15	183.00	186.82	2.09	99.66	210.03	14.77	N.D.
U-16	180.00	227.94	26.64	99.17	204.73	13.74	N.D.

Tabla 1. Resultados del cálculo de gasto de vapor en puntos E-R en plantas de la red de la Zona Norte del CGLA.

La Tabla 1 muestra los resultados del cálculo de gastos de vapor para los puntos de entrega-recepción (E-R) en las unidades generadoras de la red de la Zona Norte con ambos simuladores. La diferencia aparentemente grande observada en la planta U-16 para Pipephase puede ser atribuida a que, de acuerdo al balance de masa efectuado con los datos de producción de la fecha simulada, la producción de vapor de los pozos excedió a la requerida en las plantas.

Así, el valor reportado como medido en la Tabla 1 corresponde al gasto nominal de vapor que entró a la turbina de la planta U-16, el cual no incluye el vapor excedente no utilizado para la generación de electricidad. De esta manera, se considera que el gasto real de vapor recibido en el punto E-R de la planta U-16 debió ser más cercano al gasto de vapor calculado por el simulador Pipephase.

Los gastos calculados por Sim.Snet para los puntos E-R de las plantas de la Zona Norte concuerdan mejor que los valores obtenidos por Pipephase con excepción de la unidad U-15, para la cual Sim.Snet calcula un valor 14.77% más alto que el medido. La Tabla 1 no muestra valores de calidad correspondientes a Sim.Snet ya que este simulador no realiza este cálculo.

### Zona Sur

La Figura 7a muestra la comparación de las presiones medidas y calculadas para los pozos de la Zona Sur del CGLA con el simulador Pipephase. Para esta zona se tiene una diferencia relativa promedio de 0.80%, con una desviación estándar de 3.62. En la gráfica se puede apreciar también que uno de los pozos (Az-23) presenta una mayor discrepancia con una diferencia relativa del orden de 10%.

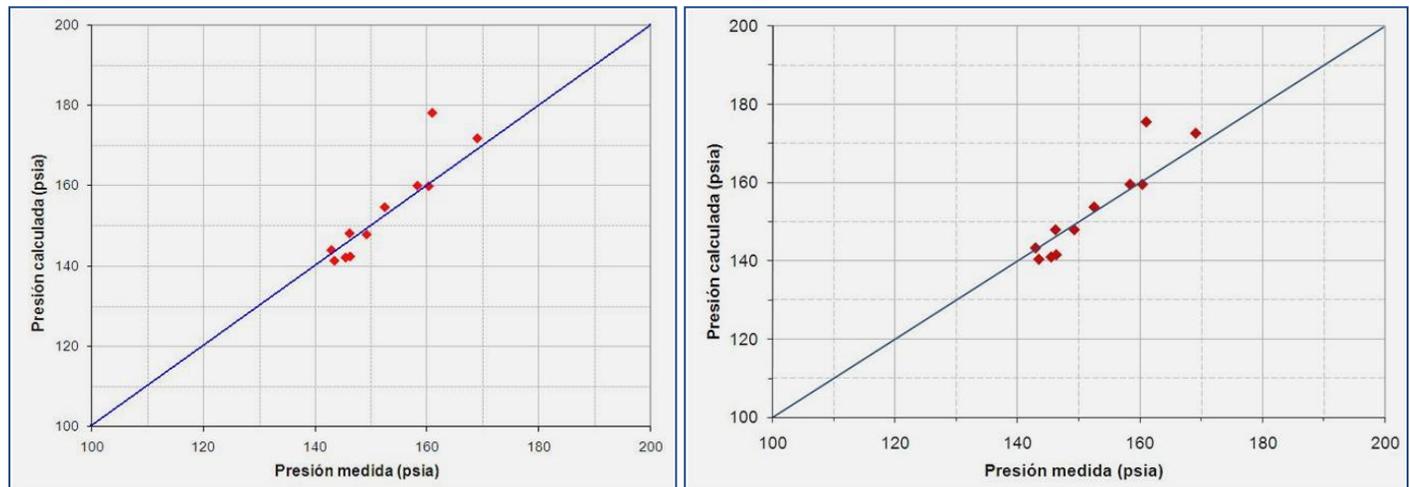


Figura 7. Comparación de presiones medidas y calculadas en pozos de la Zona Sur del CGLA, con Pipephase (7a: arriba) y con Sim.Snet (7b: abajo).

La comparación de las presiones medidas y calculadas con el simulador Sim.Snet para los pozos de la Zona Sur se muestra en la Figura 7b. La diferencia relativa promedio de las presiones calculadas es de 0.39 %, con una desviación estándar de 3.35. En la figura también se puede observar un pozo (nuevamente el Az-23) que presenta una mayor desviación (9%) de su presión simulada con respecto a su valor medido.

La Tabla 2 muestra los resultados del cálculo de gastos de vapor para los puntos de entrega-recepción (E-R) en plantas de la Zona Sur con ambos simuladores. Se presentan resultados únicamente para dos plantas ya que, como se mencionó anteriormente, el tamaño de las subredes correspondientes a las unidades U-2, U-6 y U-10 hace que su simulación sea relativamente trivial. Los resultados de ambos simuladores concuerdan muy bien con los flujos medidos, mostrando Pipephase resultados ligeramente mejores que Sim.Snet.

Unidad	Gasto medido t/h	Gasto calculado t/h	Diferencia Relativa (%)	Calidad %	Gasto calculado	Diferencia Relativa (%)	Calidad %
		Pipephase			Sim.Snet		
U-7	440.00	443.85	0.88	99.69	430.84	-2.08	N.D.
U-13	185.00	187.42	1.31	99.13	191.12	3.31	N.D.

Tabla 2. Resultados del cálculo de gasto de vapor en puntos E-R en plantas de la red de la Zona Sur del CGLA

## Discusión

En general, los resultados de los simuladores Pipephase y Sim.Snet concuerdan muy bien con los valores medidos en la Zona Norte. La Figura 8 (izquierda) muestra una comparación gráfica entre las presiones medidas y las calculadas por los simuladores. Se puede observar que ambos simuladores estiman muy bien las presiones con excepción de los pozos Az-69D y Az-67, donde ambos simuladores sobreestiman ligeramente los valores medidos correspondientes. Por otra parte, la Figura 8 (derecha) evidencia que Sim.Snet sobreestima ligeramente, con respecto a Pipephase y a la presión medida, la presión para los pozos Az-28A y Az-57. Las diferencias entre las presiones calculadas por cada simulador se deben muy probablemente a los diferentes modelos matemáticos y numéricos empleados por cada uno de ellos, ya que Sim.Snet es un simulador de una sola fase (vapor) mientras que Pipephase es multifásico.

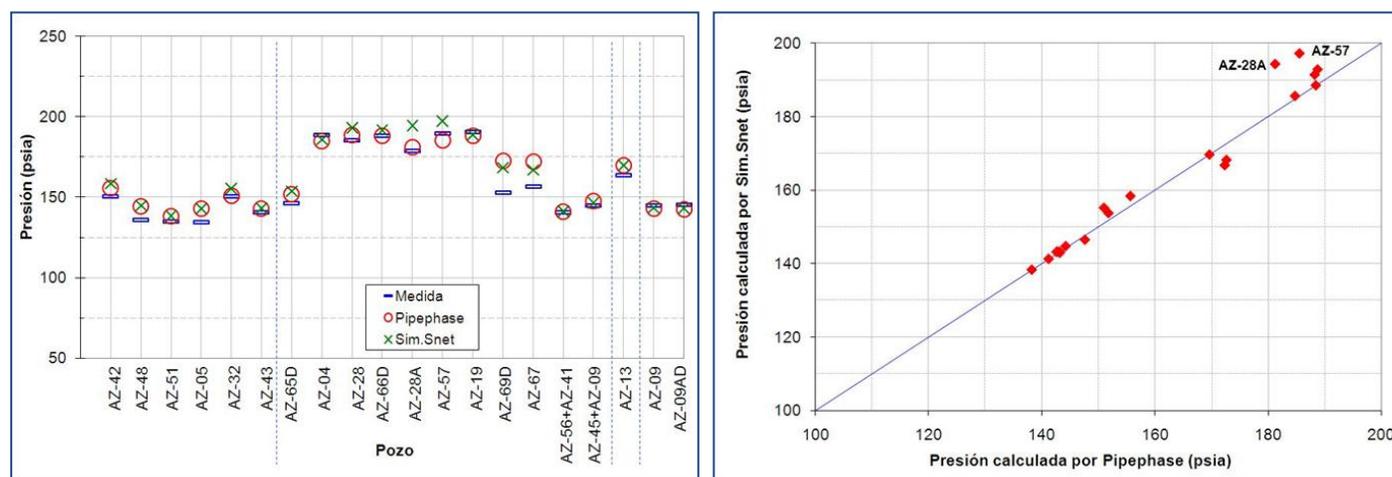


Fig. 8. Presiones medidas y presiones calculadas con los simuladores Pipephase y SimSnet para los pozos de la Zona Norte. Las líneas discontinuas verticales en color azul (izquierda) delimitan las cuatro subredes independientes.

Los flujos medidos en las unidades U-15 y U-16 son similares en magnitud. Sin embargo, sus valores, calculados por cualquiera de los simuladores, difieren en grado variable en tanto la apertura de la válvula Val-4 cambia (Figura 9). La apertura a la cual ambos flujos son iguales es aproximadamente de 15 y 8% para Pipephase y Sim.Snet, respectivamente. Además, las presiones calculadas en los pozos se ajustan mejor a los datos de campo a una apertura de 10% para Pipephase y de 8% para Sim.Snet. Al fijar la apertura de la válvula Val-4 en los valores anteriores para cada simulador, el flujo en las plantas de la Zona Norte fue obtenido por ambos simuladores como lo muestra la Figura 10. Ambos simuladores concuerdan muy bien entre sus predicciones y con los flujos medidos en plantas, con excepción de las unidades U-15 y U-16, como ya se mencionó anteriormente.

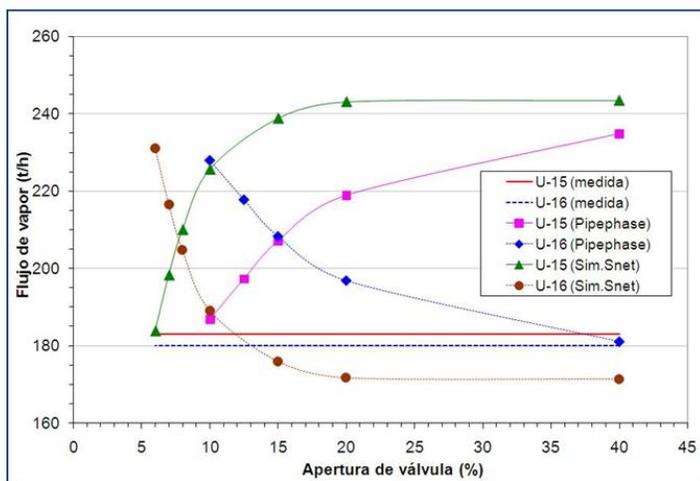


Fig. 9. Variación de la producción de vapor medida y calculada con ambos simuladores, en las unidades U-15 y U-16 en función de la apertura de la válvula Val-4.

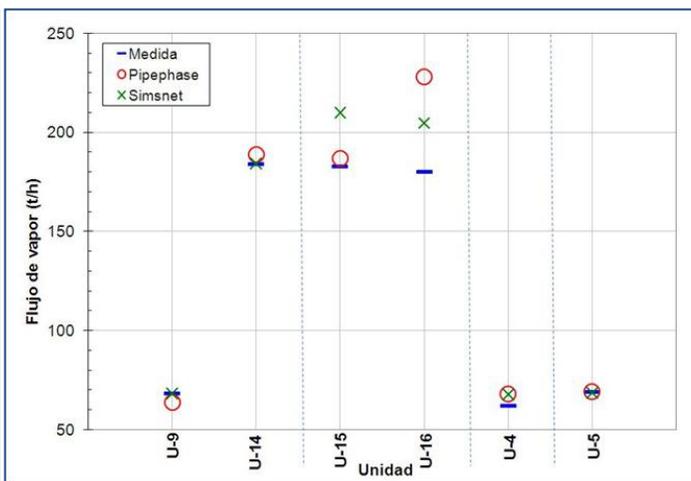


Fig. 10. Comparación de flujos medidos y calculados con Pipephase y Sim.Snet en la Zona Norte. Los guiones verticales azules delimitan las subredes independientes.

La Figura 11 muestra una comparación entre presiones medidas y calculadas por Pipephase y Sim.Snet para los pozos de la Zona Sur. Se puede observar que los valores arrojados por cada simulador concuerdan muy bien con su correspondiente presión medida; solamente en el pozo AZ-23, ambos simuladores sobre predicen su presión. De igual manera, los flujos calculados por los simuladores en los puntos E-R en las plantas de la Zona Sur concuerdan muy bien con los valores medidos, como se muestra en la Tabla 3.

Unidad	Flujo medido (t/h)	Flujo calculado (t/h)	
		Pipephase	Sim.Snet
U-7	440	443.85	430.84
U-13	185	187.42	191.12

Tabla 3. Flujos de vapor medidos y calculados (con Pipephase y Sim.Snet) para las plantas de la Zona Sur del CGLA.

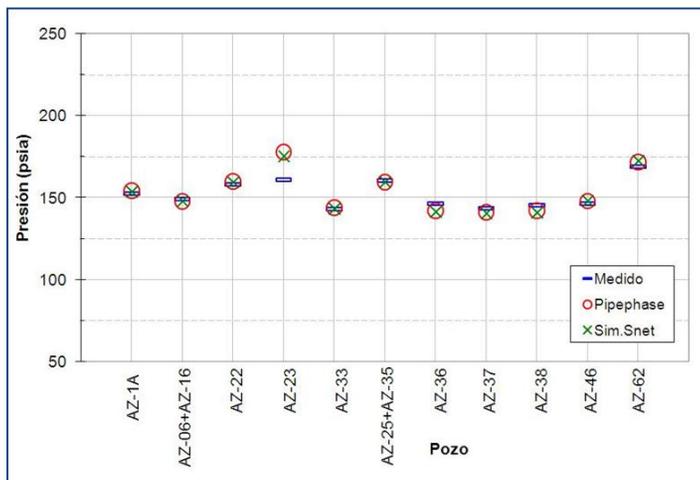


Fig. 11. Comparación de presiones medidas y calculadas por Pipephase y Sim.Snet para los pozos de la Zona Sur.

## 6. Conclusiones

Un modelo hidráulico de la red de transporte de vapor del campo geotérmico Los Azufres fue desarrollado y documentado con alto grado de detalle. El modelo incluye un total de 44 pozos, de los cuales 41 son pozos productores integrados, 12 unidades generadoras de diferentes capacidades y 28 km de ductos, agrupados en las dos zonas en que geográfica y operativamente se divide el campo.

El modelo hidráulico fue validado mediante simulaciones numéricas correspondientes a la operación de la red para un día específico, empleando los simuladores de flujo comerciales Pipephase y Sim.Snet, y efectuando una comparación de los valores calculados con los

valores operativos medidos en diferentes puntos (pozos y puntos E-R en plantas generadoras) de la red de transporte de vapor. En general, las diferencias relativas promedio entre valores medidos y simulados, tanto de presión en pozos como del cálculo de gastos de vapor en puntos E-R en planta, son menores al  $\pm 5\%$  para ambos simuladores, mientras que el cálculo de la calidad del vapor entregado a plantas es de 98.5% o mayor. Las presiones calculadas en los pozos Az-67 y Az-69D en la Zona Norte, y en el pozo Az-23 en la Zona Sur, presentaron las mayores diferencias relativas, del orden de 10%, con respecto a los valores medidos, y representan casos particulares cuyos datos operacionales requieren estudiarse con mayor detalle. En los casos que presentaron las mayores diferencias entre valores medidos y simulados de gasto de vapor en puntos E-R en planta (U-16, U-15 y U-4), éstas se atribuyen a que no se dispuso de datos medidos lo suficientemente precisos para la fecha a simular.

En general, los resultados de simulación obtenidos por Pipehase y Sim.Snet concuerdan muy bien entre ellos. Existen diferencias relativamente pequeñas entre las presiones calculadas en pozos o flujos de vapor calculados en puntos E-R en planta, debidas muy probablemente a consecuencia de los diferentes modelos matemáticos y numéricos empleados por cada simulador. De este modo, este trabajo permite concluir que el modelo hidráulico de la red de transporte de vapor del CGLA es una herramienta adecuada para estudiar el comportamiento de la red mediante la cuantificación de las caídas de presión, flujos y pérdidas de calor a través de cada uno de los componentes del sistema de transporte de vapor desde los pozos productores hasta las plantas generadoras, y que el simulador de flujo de vapor Sim.Snet puede utilizarse de manera confiable en la simulación de diferentes escenarios operativos del modelo de la red, ya sea actuales o contemplados a futuro.

El modelo desarrollado permite analizar el impacto de cambios en las condiciones de operación de la red, variaciones en la producción de vapor, actividades de mantenimiento y cambios en el diseño, así como la integración de nuevos pozos y vaporductos. Aun cuando el modelo no toma ninguna decisión sobre cómo operar la red o sus componentes, sus resultados permiten apoyar o sustentar la adopción de medidas destinadas a mejorar su operación y proporcionan al personal operativo mayores elementos para la planeación y toma de decisiones.

### **Agradecimientos**

Se agradece a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad por su autorización para la publicación de este trabajo.

### **Referencias**

- Bettagli, N., and G. Bidini, 1996. Energy analysis of the transportation network and of the electric power plants. *Geothermics*, Vol, 25, pp. 3-16.
- Cruickshank, C., E. Ordóñez, y G. Castillo G, 1990. Modelo matemático de la red de vaporductos de la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto. UNAM, Informe del proyecto 9361. Inédito.
- Di Maria, F., 2000. Design and off design pipe network geothermal power plant analysis with power pipe Simulator. *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 1223-1235.
- García, A., J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando, and E. Salaices, 2006. Numerical simulation of the Cerro Prieto steam pipeline network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, September 10-13, 2006.

- García, A., J.I. Martínez, A.F. Hernández, M. Ceceñas, R. Ovando, E. Salaices, I. Canchola, O. Mora, S. Gutiérrez, C. Miranda, M. Hernández y S. López, 2007a. Simulación numérica de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 20, No.2, pp. 2-7.
- García-Gutiérrez, A., J. Martínez-Estrella, A. Hernández-Ochoa, M. Ceceñas-Falcón, R. Ovando-Castelar, I. Canchola-Félix, O. Mora-Pérez, C. Miranda-Herrera, S. Gutiérrez-Espericueta, M. Hernández-García, y S. López-Bonilla, 2007b. Simulación numérica de flujo de vapor en la red del campo geotérmico de Cerro Prieto. *IEEE 5º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*, Cuernavaca, Morelos, México. 10-12 Octubre, 2007.
- Huang, Y., and D.H. Freeston, 1992. Non-linear modeling of a geothermal steam pipe network. *14th New Zealand Geothermal Workshop Transactions*, pp. 105-110.
- Huang, Y., and D.H. Freeston, 1993. Geothermal pipe network simulation sensitivity to pipe roughness. *15th New Zealand Geothermal Workshop Transactions*, pp.253-258.
- Invensys SIMSCI-ESSCOR, 2005a. PIPEPHASE 9.1. User's Guide. United States of America. June 2005.
- Invensys SIMSCI-ESSCOR, 2005b. PIPEPHASE 9.1. Keyword Manual, in PIPEPHASE 9.1 On-line help. United States of America, June 2005.
- Marconcini, R. and G. Neri, 1979. Numerical simulation of a steam pipeline network. *Geothermics*, Vol. 7, pp. 17- 27.
- Mukherjee, H.K., 1979. An experimental study of inclined two-phase flow. Ph.D. Thesis, University of Tulsa, Oklahoma, USA. Inédito.
- Peña, J.M., 1986. Energy losses in horizontal steam lines. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 10, pp. 347-252.
- Peña, J.M. y H. Campbell, 1988. Evaluación de las pérdidas de calor en líneas de vapor geotérmico. *Memorias del 3er. Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*, Guanajuato, Gto., 4-7 Julio, 1988, pp. 53-64.
- Technical Software and Engineering (TS&E), 2005. User's Manual for Steam Transmission Network Simulator (Sim.Snet) version 1.0, United States of America, June 2005.

# Recuperación secundaria de energía en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

*P. Sánchez-Upton<sup>1</sup>, R.A. Sánchez-Velasco<sup>2</sup>, J.A. Frost<sup>3</sup> y J.S. de León-Vivar<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Actualmente jubilado de la CFE, correo: [psupton@prodigy.net.mx](mailto:psupton@prodigy.net.mx), <sup>2</sup>Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE, Alejandro Volta 655, Morelia, Mich., 58290, México, correo: [raul.sanchez@cfe.gob.mx](mailto:raul.sanchez@cfe.gob.mx), <sup>3</sup>Geothermal Products and Services, Frost Consulting.

---

## Resumen

La capacidad de generación de energía eléctrica de los pozos de Cerro Prieto I ha declinado sustancialmente debido a la extracción continua de fluido por más de 35 años. Como resultado de la explotación se indujo el ingreso de fluidos de baja entalpía a través de la recarga natural del sistema. Esta irrupción motivó que los fluidos se mezclaran y se abatiera paulatinamente la temperatura de la formación en esta parte del yacimiento. Asimismo, la inyección de los fluidos residuales también contribuyó a la reducción de la temperatura del reservorio. Este fenómeno ha originado que múltiples pozos del área hayan dejado de fluir de manera natural a pesar de que la temperatura de los fluidos es del orden de 250°C y de que la conductividad hidráulica de la formación es todavía buena. Tomando como referencia el diagrama de Lindal estos fluidos pueden utilizarse para generar energía eléctrica a través de equipos convencionales. No obstante, la presión en el fondo de los pozos no es suficiente para que los fluidos lleguen a los equipos superficiales de separación con presiones suficientemente altas (> 8 bar). Atendiendo esta problemática, en este trabajo se explora la posibilidad de implementar un sistema de recuperación secundaria de energía (convencional-ciclo binario) a partir del empleo de bombas centrífugas verticales en fuentes de fluido con temperaturas entre 220°C y 260°C. Los resultados preliminares del estudio indican que esta tecnología es plausible para aplicar en pozos con arreglos tubulares de 9 5/8"-7" de diámetro, cuando la temperatura de los fluidos es de 220°C, pero es costosa. Sin embargo, este inconveniente puede superarse al construir nuevos pozos con diámetros de producción de 13 3/8" ó de 16". De acuerdo a los resultados del análisis, la potencia total generada neta que se espera de este sistema es de 3.6 MW para fluidos a 220°C. La potencia de la bomba de tipo flecha que se utilizaría es de 500 hp, aproximadamente.

*Palabras clave:* Recuperación de energía geotérmica, Diagrama de Lindal, bombas centrífugas verticales, sistemas convencionales de generación, ciclo binario.

## Secondary recovery of energy at the Cerro Prieto geothermal field, BC

### Abstract

The electrical-generation capacity of wells at Cerro Prieto I has decreased significantly from the continuous extraction of fluids for over 35 years. One result has been an induced entrance of low-enthalpy fluids into the natural-recharge system. The mixing of fluids has led to the gradual abatement of formation temperatures in this part of the reservoir. The injection of residual brine also has contributed to reservoir-temperature abatement, causing many wells to stop flowing naturally in spite of fluid temperatures of around 250°C and good hydraulic conductivity in the formation. Based on the Lindal Diagram, these fluids can be used to generate electrical energy using conventional plants. However, the bottom pressure of the wells is not high enough for the fluids to reach the surface-separation equipment with appropriate pressures (> 8 bar). This paper explores the possibilities for implementing a system of secondary-energy recovery (conventional-binary cycle) using vertical-centrifuge pumps and fluids at 220 to 260°C. Preliminary results indicate this technological approach is reliable for wells with casing completion diameters of 9 5/8" to 7", when the fluid

temperature is 220°C. Although this technology is expensive, the relatively high cost can be overcome by drilling new wells with production diameters of 13 3/8" or 16". According to our analysis, the total-net capacity expected in the system is 3.6 MWe using fluids at 220°C. The line-shaft pump capacity is about 500 hp.

*Keywords:* Geothermal energy recovery, Lindal Diagram, vertical centrifuge pumps, conventional generation systems, binary cycle.

---

## Introducción

Como consecuencia de la operación continua del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (CP), se ha venido observado la aparición de diversos fenómenos termo-fluídicos en los pozos productores e inyectores (Rodríguez-Rodríguez, 1999). Entre ellos está la variación irregular de los parámetros de producción (presión de cabezal, gasto másico y entalpía específica) y el desarrollo de procesos de incrustación, corrosión y erosión (Sánchez-Upton, 2003; Ocampo-Díaz *et al.*, 2006).

Muchos de estos fenómenos se han podido explicar al interpretar la información multidisciplinaria recopilada hasta ahora (producción, química e isotópica, principalmente). De esta manera se han podido inferir las direcciones preferenciales de los flujos de la recarga natural del sistema y de la inyección de los fluidos residuales (Rodríguez-Rodríguez, 1999), y la interacción de múltiples zonas de alimentación a lo largo de los pozos productores (Sánchez-Upton *et al.*, 2007), entre muchas otras características del reservorio.

La conjugación de los mecanismos de producción y reinyección ha dado lugar a un fenómeno particularmente importante en los pozos productores del área de Cerro Prieto I (CP-I). Este fenómeno se ha presentado en un número importante de pozos y se caracteriza porque estos han dejado de fluir de manera natural. Algunas de las causas que han originado este fenómeno se relacionan con problemas mecánicos e incrustación, pero la causa principal es el abatimiento significativo de la temperatura de los fluidos producidos (Ribó-Muñoz, 1998; Rodríguez-Rodríguez, 1999, 2007)

Como se sabe, los cambios termodinámicos que experimentan los fluidos en el yacimiento debido a su mezcla pueden atenuarse si se dispone de una estrategia adecuada de producción-inyección (explotación), derivada de los diferentes estudios que se realizan dentro de las áreas de ingeniería de producción y de yacimiento, incluyendo la simulación del reservorio bajo los esquemas de generación necesarios.

Independientemente de las causas por las cuales estos pozos fueron abandonados, la temperatura de los fluidos es todavía atractiva para la generación de energía eléctrica a través de sistemas de generación convencionales y de ciclo binario, de acuerdo al Diagrama de Lindal (Fig. 1).

Atendiendo esta problemática, en este trabajo se explora la factibilidad técnica de recuperar la energía de esta parte del yacimiento a través de sistemas especiales de bombeo, tomando como punto de partida las propiedades petrofísicas actuales de la formación (Frost, 2004; Xie *et al.*, 2005).

De acuerdo a estimaciones preliminares (Frost, 2006, comunicación personal), la extracción de fluidos a través de tuberías de producción de 9 5/8" no es atractiva desde el punto de vista económico, por lo que este estudio se dirige hacia la determinación de los diámetros óptimos de terminación de los nuevos pozos a perforar, para llevar a cabo la recuperación secundaria de energía.

## Antecedentes

Los equipos de bombeo para extraer fluidos de pozos geotérmicos de baja entalpía se han utilizado por varias décadas, principalmente en usos directos como calefacción de distritos (Islandia y Francia), secado de pescado, invernaderos (Hungria y Rusia), acuicultura, bombas de calor (Francia, Suecia y Suiza), e incluso para procesos de refrigeración (Gudmundsson, 1989; Lund *et al.*, 2005).

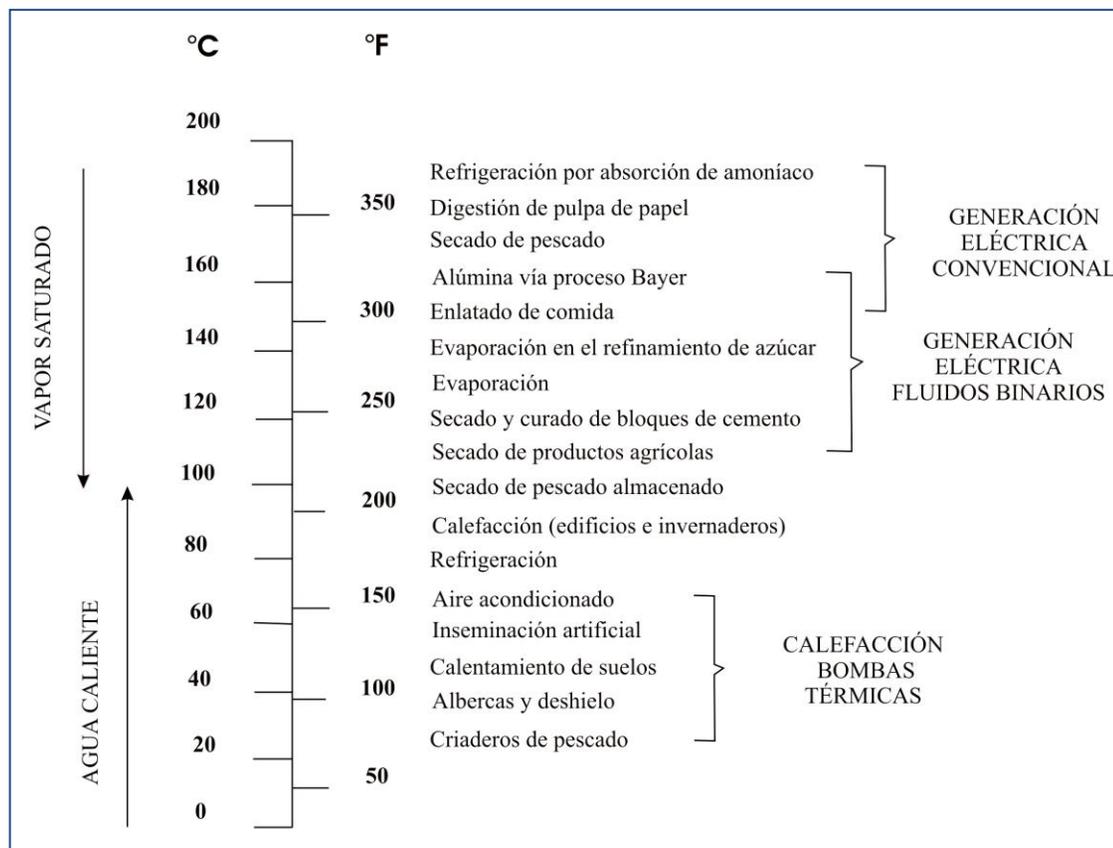


Fig. 1. Diagrama de Lindal mostrando diversas aplicaciones geotérmicas en función de la temperatura del fluido.

Como se sabe, el acarreo de fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie se puede realizar con bombas de tipo flecha y/o con bombas sumergibles (Culver, 1998; Frost, 2004; Solanki *et al.*, 2005; Xie *et al.*, 2005). La selección de cualquiera de estos dos tipos de bombas depende fundamentalmente de la temperatura de los fluidos de trabajo y de la profundidad donde se pretende emplazar la bomba. Las bombas de tipo flecha (*lineshaft pumps*) operan preferentemente a velocidades angulares  $\leq 1750$  rpm. Estas bombas presentan dos limitantes fundamentales, estas son: (a) se deben instalar en pozos totalmente verticales o sobredimensionados, previendo que se puedan sujetar rígidamente la bomba y la columna (tubería por donde asciende el fluido); y (b) la profundidad de la bomba.

Por otro lado, las bombas sumergibles (*submersible pumps*) operan satisfactoriamente para velocidades angulares  $\leq 3500$  rpm y pueden instalarse en pozos con curvaturas importantes (la parte más profunda puede tener una desviación hasta de  $75^\circ$  con respecto a la vertical), siempre y cuando la desviación sea menor a  $0.131^\circ/\text{m}$ . Aunque estas bombas prácticamente no tienen límite con respecto a la profundidad, la temperatura máxima de operación está restringida a  $220^\circ\text{C}$ , aproximadamente (Culver, 1998; Solanki *et al.*, 2005). Debido a esta restricción, las bombas sumergibles tienen un campo reducido de aplicación para la recuperación secundaria de energía geotérmica en Cerro Prieto.

De acuerdo a la experiencia, las bombas centrífugas verticales de tipo flecha puede localizarse entre 245 m y 600 m de profundidad (Culver, 1998; Xie *et al.*, 2005). Estas bombas usualmente están provistas de múltiples etapas de bombeo con eficiencias entre 68% y 78%. El número de etapas depende directamente de la carga hidráulica, principalmente.

En las bombas de tipo flecha, el cabezal soporta las cargas de la columna y de la flecha (incluyendo la cubierta de la flecha cuando esta se lubrica con aceite o con agua). La flecha, a la vez, soporta la carga de los múltiples tazones de la bomba y del arreglo de succión. La columna usualmente está formada por secciones tubulares con longitudes de 6 m (20 pies) y se unen a través de conexiones con cuerdas o con bridas. Las bombas con flechas expuestas (sin la cubierta para lubricación con aceite) han tenido poco éxito en la industria geotérmica, ya que han exhibido un desgaste más acelerado principalmente por corrosión. Las flechas expuestas, en general, deben ser fabricadas con acero inoxidable para resistir el ataque corrosivo. Como resultado del alto costo de estos materiales especiales y del corto periodo de servicio, usualmente se prefiere un diseño de flecha cerrado, excepto en los casos en que las temperaturas de trabajo son bajas (<60°C) y los fluidos muy limpios. Las cargas de la flecha y de todas las partes rotativas están soportadas por el cojinete de empuje de la flecha (hueca) del motor o por una unión separada que contiene al cojinete de empuje. Cuando una bomba vertical se detiene, el fluido tiende a descender a través de la columna por lo que se induce un movimiento de la flecha en sentido opuesto (*back spin*).

Ya que la bomba actúa como generador del movimiento, hay poco riesgo de que la flecha se desacople por este motivo. Sin embargo, si la bomba se reinicia cuando el fluido se encuentra descendiendo es probable que la flecha se rompa, que el motor se dañe, o que se desprendan algunos otros componentes. Esto puede ocurrir durante una falla momentánea en el suministro de energía o cuando los controles envían una señal de inicio antes de que la columna se drene totalmente. Existen algunos accesorios y circuitos electrónicos que pueden prever esta situación [por ejemplo, válvulas de pie, engranes contra-reversa, interruptores que se activan después de haber transcurrido un cierto periodo de tiempo (*time delay switches*) e interruptores accionados a través de sensores de rotación]. Por otro lado, hay ciertas ventajas en permitir el retorno del fluido. El movimiento en sentido contrario al natural indica que nada está rozando y que nada se encuentra desalineado. Esto también permite que la bomba arranque con baja carga y que se reduzca el riesgo de ocurrencia de problemas en flechas y cojinetes.

Como es de esperarse, por otro lado, una de las condiciones para llevar a cabo la explotación secundaria es que los pozos continúen presentando una buena conductividad hidráulica y que el contenido energético de los fluidos permita generar energía eléctrica. Para realizar la evaluación preliminar de este proyecto se requiere conocer algunos parámetros básicos del pozo antes de que este haya dejado de fluir, como son las distribuciones de presión y temperatura a lo largo del pozo, por lo menos para dos diferentes condiciones de flujo, las curvas características y la caracterización química de los fluidos. A partir de esta información se pueden inferir algunos parámetros específicos de la formación y del pozo, como el índice de productividad, la localización del nivel estático y las posibles causas por las cuales el pozo dejó de fluir. Esta información es necesaria para definir qué pozos pueden ser considerados dentro del programa de recuperación secundaria.

Una vez realizada la selección preliminar de pozos se debe escoger cuando menos uno en el que se llevarán a cabo algunas pruebas formales de bombeo. Estas pruebas permiten verificar la validez de los resultados previamente calculados (principalmente el abatimiento del nivel de espejo de agua en función de los gastos extraídos), pero el objetivo primario es la determinación de las características de las bombas que finalmente se deberán instalar en el campo.

Estas pruebas, en general, se utilizan para optimizar el gasto de extracción y la potencia requerida. Cabe señalar que en estas pruebas puede presentarse el caso de que el nivel del pozo descienda continuamente como resultado de la extracción de un gasto másico. En general, esto implicaría que la formación no es capaz de suministrar ese gasto dado, es decir que no puede sostener esa producción de manera permanente. Este comportamiento puede deberse al sobredimensionamiento de la bomba, o bien a problemas en el yacimiento. En este último caso, el taponamiento de la formación por incrustación podría ser el principal causante de la declinación del gasto másico. Si el abatimiento de nivel es continuo, el fluido irremediablemente alcanzará

condiciones de saturación si la temperatura es suficientemente alta ( $>100^{\circ}\text{C}$ ). A medida que el fluido se acerca a las condiciones de saturación surgen dos problemas principales. Por un lado, pueden inducirse fenómenos de cavitación en la bomba, y por el otro el pozo puede hallarse en condiciones propicias para que fluya por sí solo.

Se han publicado algunos trabajos en los que se investiga la recuperación secundaria con fines de generar energía eléctrica a través de ciclo binario (Xie *et al.*, 2005). Sin embargo, estos estudios han sido aproximaciones semi-empíricas incompletas con limitado valor práctico.

### Disponibilidad de fluido

Para determinar la capacidad de generación de un pozo a través del método de recuperación secundaria de energía es necesario realizar una serie de pruebas, similares a las que se aplican durante el aforo de un pozo de agua. A continuación se describe un método alternativo que puede utilizarse para estimar en forma aproximada esta capacidad de generación.

Como es de esperarse, para llevar a cabo la evaluación del pozo se requiere conocer la localización del nivel de agua y las distribuciones de presión y temperatura, como se mencionó en la sección anterior. Con respecto a este último parámetro, es imprescindible conocer la temperatura de la fuente de fluido. Asimismo, es necesario tener una idea realista de la magnitud del índice de productividad, el cual se define como:

$$I = \frac{\dot{m}}{\Delta p} = \frac{\dot{m}}{p_y - p_{wf}} = \frac{2\pi kh}{v\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (1)$$

donde  $I$  es el índice de productividad de un pozo que se encuentra en un yacimiento con geometría radial que está sujeto a un ritmo de explotación en estado permanente;  $\dot{m}$  es el gasto másico de fluido;  $p_y$  es la presión media del yacimiento;  $p_{wf}$  es la presión del fluido a la profundidad donde se localiza la zona de producción;  $\Delta p$  es la diferencia de presión;  $k$  es la permeabilidad de la formación;  $h$  es el espesor del yacimiento;  $v$  y  $\mu$  son el volumen específico y viscosidad del fluido, respectivamente; y  $r_e$  y  $r_w$  son los radios de influencia e interno del pozo, respectivamente. El índice de productividad se puede estimar a partir de dos registros de presión corridos bajo diferentes condiciones de flujo. Uno de los registros incluso se puede correr cuando el pozo se encuentre cerrado (gasto másico nulo). De esta manera, el índice de productividad se puede computar con la ecuación (1). También es importante conocer el probable ritmo de abatimiento de la producción de fluido.

De acuerdo a las observaciones de campo (Ribó-Muñoz, 1998; Rodríguez-Rodríguez, 1999, 2007) el valor más probable del índice de productividad se encuentra entre 5 t/h/bar y 10 t/h/bar. En los cálculos de esta sección se consideró que el índice de productividad tiene el valor más grande. Asimismo, se examinaron los casos en que la temperatura de la fuente de fluidos fue de  $220^{\circ}\text{C}$ ,  $230^{\circ}\text{C}$ ,  $240^{\circ}\text{C}$ ,  $250^{\circ}\text{C}$ , y  $260^{\circ}\text{C}$ . En este análisis también se consideraron los pozos de la parte norte de CP-I (por ejemplo el M-5) cuyo nivel de espejo de agua se encuentra a 250 m de profundidad (Fig. 2).

Para iniciar el cálculo es necesario determinar la presión del fluido que asegure que éste se encuentre en fase líquida. Las presiones mínimas a las que el fluido puede estar como líquido son las presiones de saturación correspondientes a las temperaturas arriba señaladas. En la Tabla 1 aparecen los valores calculados de estas presiones (Sánchez-Upton, 2007).

Temperatura [°C]	220	230	240	250	260
Presión de saturación [bar]	23.2	28.0	33.5	39.8	46.9
Carga por presión [m]	277.6	340.9	415.5	502.3	606.6
Nivel dinámico [m]	482.4	419.1	344.5	257.7	153.4
Carga de agua disponible [m]	232.4	169.1	94.5	7.7	-96.6
$\Delta p_{760m}$ [bar]	19.2	13.7	7.5	0.6	-
$\dot{m}_m$ [t h <sup>-1</sup> ]	192	137	75	6	-
$\dot{m}_{v8bar}$ [t h <sup>-1</sup> ]	20.9	18.0	11.6	1.1	-
$\dot{m}_{l8bar}$ [t h <sup>-1</sup> ]	171.1	119.0	63.4	4.9	-

Tabla 1. Temperaturas de las diferentes fuentes de alimentación de fluidos y parámetros estimados. En estos cálculos se ha considerado que las profundidades del nivel de espejo de agua era de 250 m y la de la bomba de 760 m.

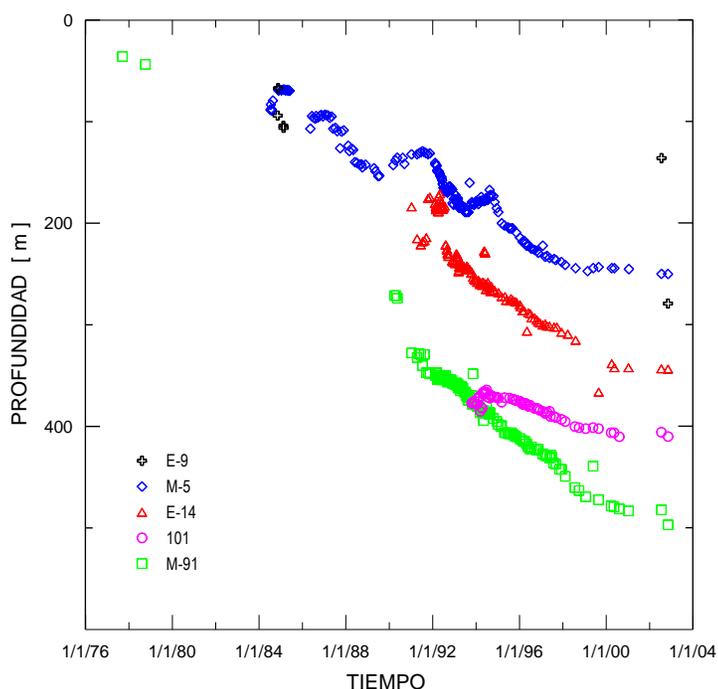


Fig. 2. Evolución del nivel del espejo de agua en el interior de los pozos observadores de CP-I.

Ahora se requiere conocer la longitud aproximada de la columna que equivale a cada una de estas presiones. La columna de fluido se calcula de la manera siguiente (Frost, 2004 y 2006):

$$h_{cf} = S_u = \frac{[p_{sat} - p_a + p_{CO_2}]v}{g} \quad (2)$$

donde  $h_{cf}$  es la carga debida a la columna de fluido;  $S_u$  se denomina sumergimiento (*submergence*);  $p_{sat}$  es la presión de saturación correspondiente a la temperatura de la fuente de fluido;  $p_{am}$  es la presión atmosférica local (1.01325 bar);  $p_{CO_2}$  es la presión parcial de  $CO_2$ ; y  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.80665 \text{ m s}^{-2}$ ). Para todas estas condiciones termodinámicas el valor medio del volumen específico es  $\bar{v} \approx 0.001231 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Las cargas de presión para cada una de las temperaturas de la fuente de fluido se muestran en la Tabla 1. En estos cálculos se consideró que  $p_{CO_2} = 0.68947 \text{ bar}$ .

De acuerdo a la experiencia se ha observado que la profundidad máxima a la que se puede localizar la bomba es 760 m (Frost, 2006). Tomando esta última profundidad y la información correspondiente para el cálculo [ecuación (1)], se estimaron algunos parámetros como los valores de  $\Delta p_{760m}$ ,  $\dot{m}_m$ ,  $\dot{m}_{v8bar}$  y  $\dot{m}_{l8bar}$  que aparecen en la Tabla 1 y en la Fig. 3.

### Potencia de la bomba

Tomando en cuenta los resultados que se muestran en la Tabla 1, en esta sección se estima la potencia del equipo de bombeo que se requiere para el caso en que la fuente de fluido tiene una temperatura de 220°C. El

análisis se basa en la teoría propuesta por Frost (2004). La carga total de la bomba (*total bowl head*) está dada por:

$$TBH = h_s + h_f \quad (3)$$

donde  $TBH$  es la carga total de la bomba;  $h_f$  es la carga por fricción; y  $h_s$  es la carga estática (*lift*). Sustituyendo valores:

$$TBH = 482.4 + 41.4 = 523.8m$$

En el cálculo de la carga por fricción se consideró que el factor de fricción es 0.015 y que los diámetros de la columna y de la flecha son de 8" y 3 1/2", respectivamente. La velocidad calculada del fluido es de  $2.7 \text{ m s}^{-1}$ . Entonces, la potencia de la bomba al freno se calcula como:

$$P_b = \frac{\gamma QH}{\eta} = \frac{\rho g TBH}{\eta} \quad (4)$$

Donde  $P_b$  es la potencia de la bomba al freno; y  $\eta$  es la eficiencia de la bomba. Sustituyendo valores se obtiene una potencia de 458.9 hp:

$$P_b = \frac{(53.3)(9.81)(523.8)}{0.8} = 0.34MW = 458.9hp$$

La potencia total del motor (incluyendo pérdidas por fricción en la flecha y pérdidas en cojinetes) es aproximadamente un 10% más alta que el valor calculado para la potencia de la bomba, esto es:  $458.9 * 1.1 = 504.8 \text{ hp}$  (aproximadamente 0.38 MW).

## Discusión

La capacidad de generación de energía eléctrica de los pozos sujetos a un proceso de recuperación secundaria de energía depende de cuatro parámetros fundamentales: (i) la profundidad del espejo de agua; (ii) el gasto másico que se pretende extraer, es decir, el índice de productividad del pozo; (iii) la temperatura de la fuente de alimentación del fluido; y (iv) la declinación de la producción de fluidos debido a la reducción de la presión del yacimiento.

El gasto másico de fluido extraíble del pozo puede estar limitado por razones técnicas, principalmente por la profundidad a la que las bombas de tipo flecha se pueden fijar. Como se apuntó antes, de acuerdo a la experiencia la profundidad máxima es de 760 m (Frost, 2006).

Para un cierto gasto másico de fluido, la localización del nivel dinámico del fluido está en función directa del índice de productividad del pozo. Se sabe que el fluido en la sección de succión de la bomba debe encontrarse en estado líquido a la temperatura de la fuente de fluido. Esto quiere decir que la columna de fluido por arriba de la bomba debe ser mayor o igual que la presión de saturación del fluido. En consecuencia, entre mayor sea la temperatura del fluido mayor es la longitud de esta columna, y por tanto la bomba debe emplazarse a mayor profundidad. Como es de esperarse para el caso de CP-I, el gasto másico máximo que puede extraerse del pozo queda establecido al fijar la bomba a la profundidad máxima (Tabla 1). Cabe señalar que cuando se presenta una declinación de la producción de fluido, en esa misma medida debe

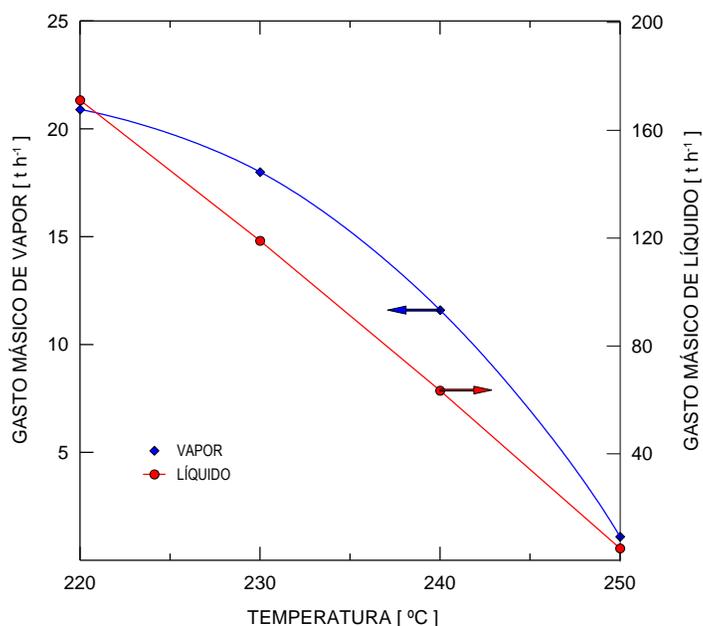


Fig. 3. Producciones de vapor y líquido (a una presión de separación de 8 bar) en función de la temperatura de la fuente de fluido.

reducirse la extracción de gasto másico, evitando la generación de vapor y la reducción de la eficiencia de la bomba por cavitación.

Por otro lado, los equipos de bombeo que actualmente se encuentran disponibles en el mercado internacional se han diseñado para pozos con tuberías de diámetros grandes (por ejemplo 13 3/8" y 16"). Por lo tanto, para el caso de CP-I, donde la tubería de producción tiene un diámetro de 9 5/8", habría que desarrollar sistemas de bombeo específicos para este diámetro. Sin embargo, a partir del análisis económico de este proyecto (Frost, 2006) resulta más atractivo construir los nuevos pozos con diámetros mayores (13 3/8" ó 16") que desarrollar un nuevo diseño para los pozos actuales de CP-I.

## Conclusiones

- De acuerdo a los resultados de esta investigación, solamente los pozos de CP-I con temperaturas entre 220°C y 230°C podrían someterse al método de recuperación secundaria de energía.
- La capacidad de generación de los pozos que cuentan con una fuente de fluidos de 220°C se estima en 3.6 MW. En este proceso se requiere que el fluido extraído se haga pasar a través de una sola etapa de separación. Asimismo, el fluido residual se tiene que hacer pasar por una unidad de ciclo binario (Fig. 4).

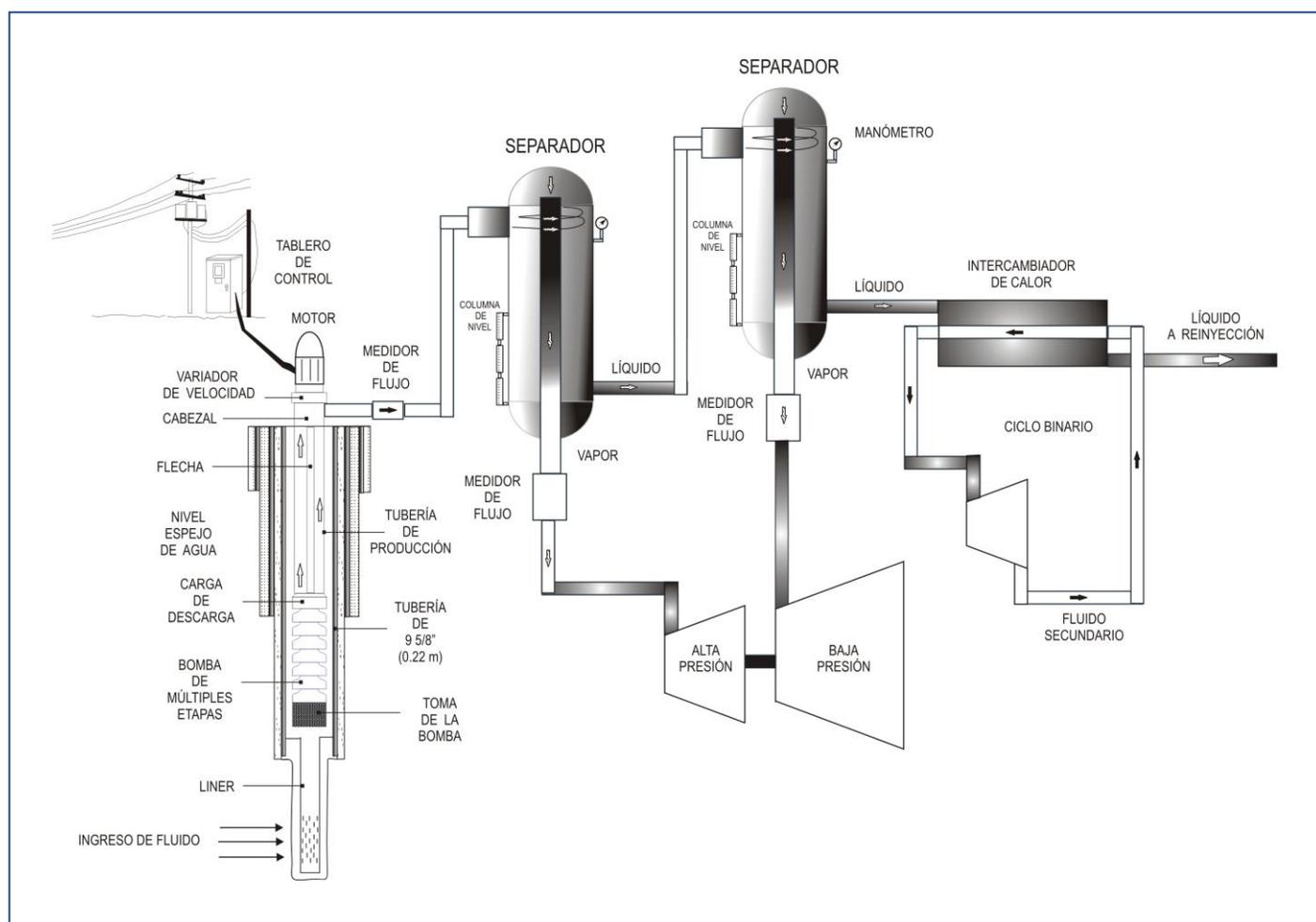


Fig. 4. Diagrama esquemático que muestra la extracción de fluidos geotérmicos a partir de bombas centrífugas verticales y el aprovechamiento de la energía a través de equipos de generación convencional (alta y baja presión) y no convencional (ciclo binario).

- c) La potencia de la bomba que se requiere para extraer el fluido del pozo es de 500 hp (0.4 MW), aproximadamente.
- d) Para el caso de nuevos pozos con tuberías de producción de 13 3/8" y de 16" de diámetro, de acuerdo a la ecuación (1) se esperarían incrementos de los gastos máxicos de fluido de 14% y de 18.4%, respectivamente. La capacidad de generación de energía eléctrica con estos diámetros aumenta de manera proporcional aproximadamente.

## Referencias

- Culver, G., 1998. *Chapter 9: Well pumps*. Publication of the Geo-Heat Center, pp. 211-230.
- Frost, J.A., 2004. Down hole geothermal pump seminar: Monitoring, evaluating and optimizing pump selection. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 28.
- Frost, J.A., 2006. Comunicación personal.
- Gudmundsson, A.T., 1989. *Energy resources and dams in Iceland*. Publication of The National Power Company, The Icelandic National Committee on Large Dams and the National Energy Authority, 97 p.
- Lund, J.W., D.H. Freeston, and T.L. Boyd, 2005. Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide Review. *Geothermics* 34, pp. 691-727.
- Ocampo-Díaz, J.D., De León-Vivar, J., y Pelayo-Ledezma, A., 2006. Declinación de la producción del pozo E-54 en el campo geotérmico de Cerro Prieto a causa de la incrustación. *Geotermia*, Vol. 19, No. 1, pp. 9-21.
- Ribó-Muñoz, M.O., 1998. Modelado y simulación numérica del yacimiento de Cerro Prieto. Reporte Interno: RE-008/97 de la Residencia General de Cerro Prieto, CFE. 152 p. Inédito.
- Rodríguez-Rodríguez, M.H., 1999. Estado actual del área de Cerro Prieto I a 27 años de explotación. Reporte Interno RE-018/99 de la Residencia General de Cerro Prieto, CFE. 44 p. Inédito.
- Rodríguez-Rodríguez, M.H., 2007. Comunicación personal.
- Sánchez-Upton, P., 2003. Atenuación de la rapidez de erosión-corrosión en la tubería de producción del pozo 410 (Área: Cerro Prieto Cuatro). Reporte interno de la Subgerencia de Estudios, CFE, 38 p. Inédito.
- Sánchez-Upton, P., 2007. Modelado numérico del flujo vertical ascendente de flujos bifásicos tri-componentes (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl) en pozos geotérmicos. Tesis doctoral en preparación, CIE-UNAM. Inédito.
- Sánchez-Upton, P., E. Santoyo, y M.H. Rodríguez-Rodríguez, 2007. Estimación del flujo de calor entre el pozo y la formación a partir de registros de presión: simulación de pozos. *Memorias de la II Reunión Interna de Mejora Continua (RIMC)*, CFE, 22-23 Febrero 2007, Mexicali, BC.
- Solanki, S., B. Karpuk, R. Bowman, and D. Rowatt, 2005. Steam assisted gravity drainage with electric submersible pumping system. *Transactions of the Electric Submersible Workshop (ESW)*, Society of Petroleum Engineering-Gulf Coast, 9 p.

Xie, X., K.K. Bloomfield, G.L. Mines, and G.M. Shook, 2005. *Design considerations for artificial lifting of enhanced geothermal system fluids*. Report No. INL/EXT-05-00533, Idaho National Laboratory, Idaho, USA. 27 p.

# Cambios geoquímicos en fluidos del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, durante 1997-2007: Identificación de procesos de yacimiento

*Rosa María Barragán<sup>1</sup>, Eduardo Iglesias<sup>1</sup>, Rodolfo J. Torres<sup>1</sup>, Víctor M. Arellano<sup>1</sup>, Neftalí Reyes-Picasso<sup>1</sup>, Miguel Ramírez<sup>2</sup>, Ruth Tapia<sup>3</sup>, Pedro Hernández<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Correo: [rmb@iie.org.mx](mailto:rmb@iie.org.mx), <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58290, Mich., México, <sup>3</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México.

---

## Resumen

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, localizado en la parte central de la Península de Baja California, cuenta con una capacidad instalada de 10 MWe. El yacimiento es de tipo líquido dominante con temperaturas en el rango de 250-275°C. En este trabajo se presenta una identificación de los principales procesos de yacimiento con base en los cambios geoquímicos de los fluidos producidos durante 1997-2007. Los resultados indican la ocurrencia de procesos de mezcla típicamente entre dos componentes primarios principales. Uno corresponde al fluido característico del yacimiento (274°C y concentración de Cl de ~6,745 ppm), el cual es producido por el pozo más profundo de campo, el LV-13 (2414 m de profundidad); mientras que el otro componente presenta menor temperatura y salinidad (171-202°C, concentración de Cl de ~500 ppm) y se asemeja al fluido producido en el pasado por el pozo más somero del campo, el LV-2 (1270 m de profundidad). De acuerdo con los resultados obtenidos, se propone que los fluidos descargados a lo largo del tiempo por los pozos LV-1, LV-3, LV-4 y LV-11 consisten de mezclas de diversas fracciones de los dos fluidos primarios mencionados. Además, por medio del análisis de diversas estimaciones de entalpía de los pozos a través del tiempo, se evidenciaron múltiples entradas de fluidos en los pozos, por lo que es probable que la mezcla de fluidos ocurra en el pozo, favoreciendo el depósito de minerales y los fenómenos de incrustación que se han observado en este campo.

*Palabras clave:* Las Tres Vírgenes, geoquímica de líquidos, mezcla de fluidos, evolución geoquímica.

## Geochemical changes of fluids in the Las Tres Vírgenes geothermal field, BCS, from 1997-2007: Identification of reservoir processes

### Abstract

The Las Tres Vírgenes geothermal field, in the middle of the Baja California peninsula, has an installed capacity of 10 MWe. The reservoir is liquid dominated with temperatures ranging from 250°C to 275°C. This paper identifies the main reservoir processes based on geochemical changes of produced fluids from 1997 to 2007. The results indicate a mixing of processes, typically between two main components. One component corresponds to the characteristic reservoir fluid (274°C with a Cl content of ~6745 ppm) produced by the deepest well in the field (well LV-13 at 2414 m depth) and the other component, showing lower temperatures and salinity (171-202°C and a Cl content of ~500 ppm), is similar to the fluid once produced by the shallowest well in the field (well LV-2 at 1270 m depth). Based on the results, we propose fluids produced through time by wells LV-1, LV-3, LV-4, and LV-11 consist of mixtures with different proportions of the two—just mentioned—primary fluids. An analysis of diverse well-enthalpy estimates during this period shows multiple entrances of fluids into the wells. Probably the fluid mixing occurs inside the wells, thus favoring mineral deposits and scaling processes observed in the field.

**Keywords:** Las Tres Vírgenes, liquid geochemistry, fluid mixture, geochemical evolution.

## 1. Introducción

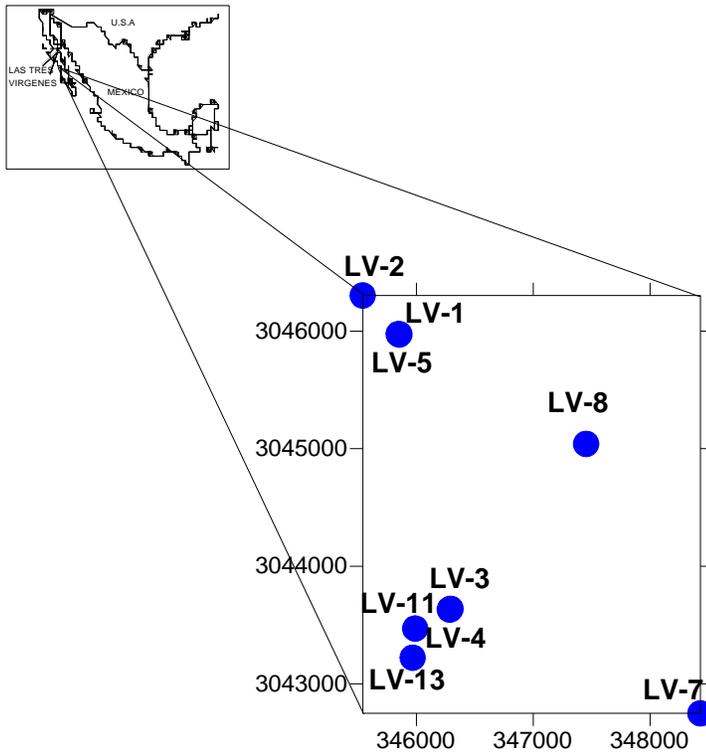


Fig. 1. Localización del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes y de sus pozos.

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se localiza en el estado de Baja California Sur en la Península de Baja California (Fig. 1). Actualmente cuenta con una capacidad instalada 10 MWe (Gutiérrez-Negrín, 2007) y su capacidad se ha estimado de 10 a 20 MWe (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). Los estudios de exploración en el área empezaron en 1982 y el primer pozo exploratorio (LV-2) se perforó en 1988 (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). A la fecha se han perforado al menos nueve pozos en dos zonas separadas: LV-1, LV-2 y LV-5 (actualmente no productores) en la zona norte; LV-3, LV-4, LV-11 y LV-13 en la zona sur; y LV-7 y LV-8 localizados hacia el este (Fig. 1). Los pozos LV-2, LV-7 y LV-8 se utilizan como inyectores. Los pozos de la zona sur producen fluidos más salinos y de mayor temperatura con respecto a los pozos de la zona norte (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). Truesdell (1998) y Portugal *et al.* (2000) han propuesto modelos geoquímicos para el yacimiento de Las Tres Vírgenes. En este campo se ha observado la

formación de incrustaciones en algunos pozos por lo que se utiliza rutinariamente un inhibidor comercial (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001).

En 2007 se realizó un estudio para investigar los principales procesos que ocurren en el yacimiento debido a la explotación (Iglesias *et al.*, 2007). Algunos resultados basados en el equilibrio fluido-mineral indicaron múltiples entradas de fluidos a los pozos y mezcla de fluidos, en virtud de que los índices de saturación de minerales característicos mostraron equilibrio a diferentes temperaturas (Barragán *et al.*, 2010). Entonces es posible que la formación de incrustaciones observada en el campo obedezca al menos en parte a la mezcla de fluidos (Arnórsson, 1992; Bethke, 1996). El objetivo de este trabajo es caracterizar los procesos de mezcla y dilución que ocurren en el yacimiento de Las Tres Vírgenes por medio de las características geoquímicas de los fluidos producidos a través del tiempo, con el fin de apoyar estudios relacionados tanto con los fenómenos de incrustación como con el comportamiento hidrológico del yacimiento. Este estudio incluye datos geoquímicos de los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5, LV-11 y LV-13 proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

## 2. Metodología

Los indicadores geoquímicos utilizados fueron las concentraciones de iones, las estimaciones de la temperatura de yacimiento por medio de diversos geotermómetros  $T_{SiO_2}$  (Fournier y Potter II, 1982),  $T_{Na-K-Ca}$  (Fournier y Truesdell, 1973) y  $T_{Na/K}$  (Nieva y Nieva, 1987); entalpías de las descargas totales, y  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$  en los fluidos. Para investigar procesos de yacimiento se utilizó el método basado en la comparación de diversas estimaciones de entalpía (entalpía de la descarga total y entalpías interpoladas de las tablas de vapor correspondientes a las temperaturas Na/K, Na-K-Ca y sílice) de un pozo específico contra el tiempo (Truesdell *et al.*, 1995). Para investigar relaciones de mezcla se obtuvieron correlaciones lineales entre especies químicas conservativas e isotópicas y para estimar las características de los fluidos primarios participantes de la mezcla se utilizó el modelo de mezcla entalpía-cloruros (Truesdell y Fournier, 1975).

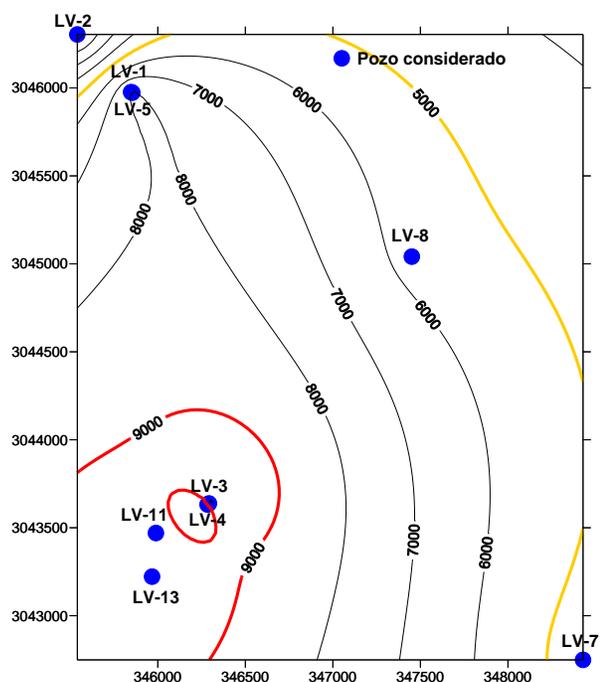
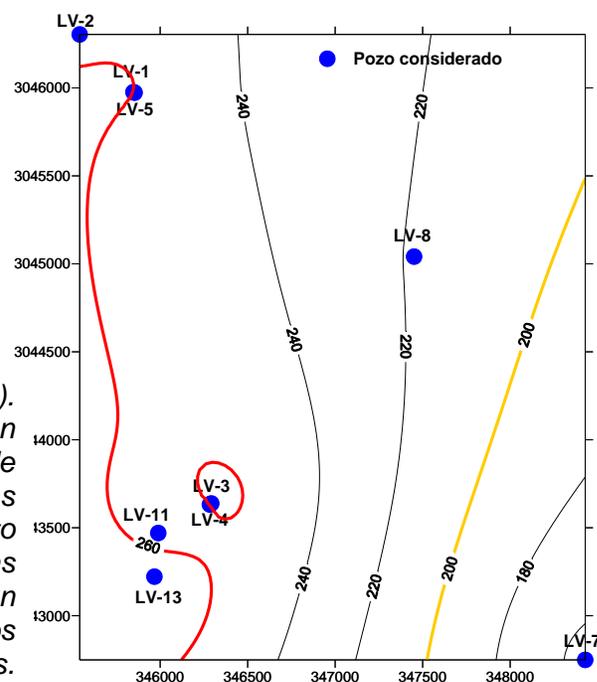


Fig. 2 (izq.).  
Distribución  
de cloruros  
en agua  
separada,  
según datos  
tempranos.

Fig. 3 (der.).  
Distribución  
de  
temperaturas  
de yacimiento  
estimadas  
(Na/K), según  
datos  
tempranos.



### 3. Resultados

#### 3.1 Condiciones pre-explotación

Se consideraron datos geoquímicos tempranos de fluidos de pozos de Las Tres Vírgenes para investigar las distribuciones de cloruros (Fig. 2) y temperaturas estimadas de yacimiento (Fig. 3) en sus condiciones iniciales. Como se aprecia en la Figura 2 las máximas concentraciones de cloruros (9000 ppm) se localizan en la zona sur con tendencia a decrecer tanto hacia el norte hasta valores muy bajos en el pozo LV-2 como hacia el este del campo con valores menores a 5000 ppm en el pozo LV-7. La distribución de temperatura (Fig. 3) muestra valores máximos ( $> 260^{\circ}C$ ) en el pozo LV-13 de la zona sur mientras que temperaturas de  $\sim 260^{\circ}C$  se localizan tanto hacia el norte como hacia el sur, decayendo en el pozo LV-2. Las temperaturas decrecen hacia el este del campo a valores menores de  $160^{\circ}C$  en el pozo LV-7. Las distribuciones de cloruros y de temperatura indican que el ascenso principal de fluidos se localiza en la zona sur y que la dirección del flujo es hacia el norte (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001).

#### 3.2 Evidencias de mezcla

Tomando en cuenta que los elementos B, Li y Cl son especies conservativas (Giggenbach, 1992), estos se utilizaron para investigar si los fluidos producidos provienen de una fuente única o si existe más de una fuente en el sistema. En la Figura 4 se muestran los promedios anuales de B vs Cl para todos los pozos y se

observa una tendencia lineal que sugiere mezcla de fluidos. La línea de ajuste tiene un coeficiente de correlación de 0.87. Como se aprecia en la Figura 4, los componentes primarios de la mezcla (extremos de la línea) son los fluidos del pozo LV-13 (el más profundo, a 2414 m), que constituyen el componente más caliente y más salino, y los del pozo LV-2 (el más somero a 1270 m), que denotan el componente menos salino y de menor temperatura. La composición de los fluidos producidos por los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5 y LV-11 se alinea en la tendencia indicando que consisten de diferentes proporciones de los dos componentes primarios.

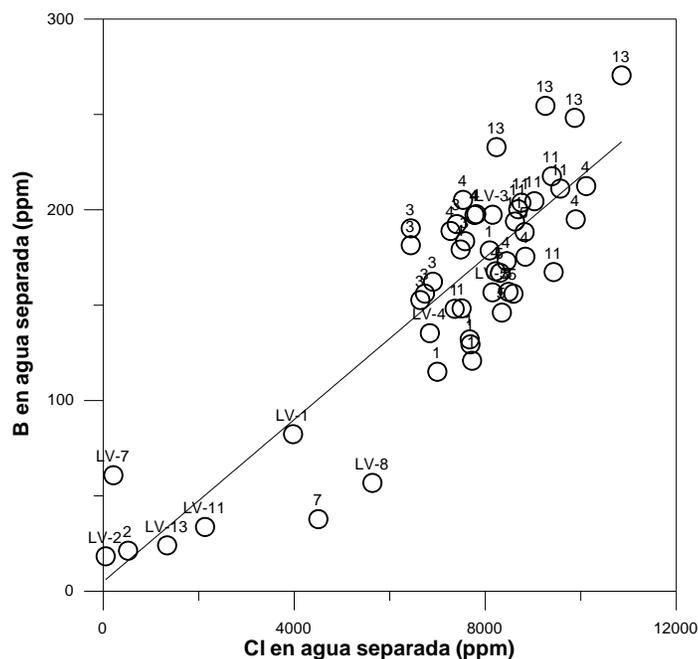


Fig. 4. B vs Cl en agua separada de pozos de Las Tres Vírgenes.

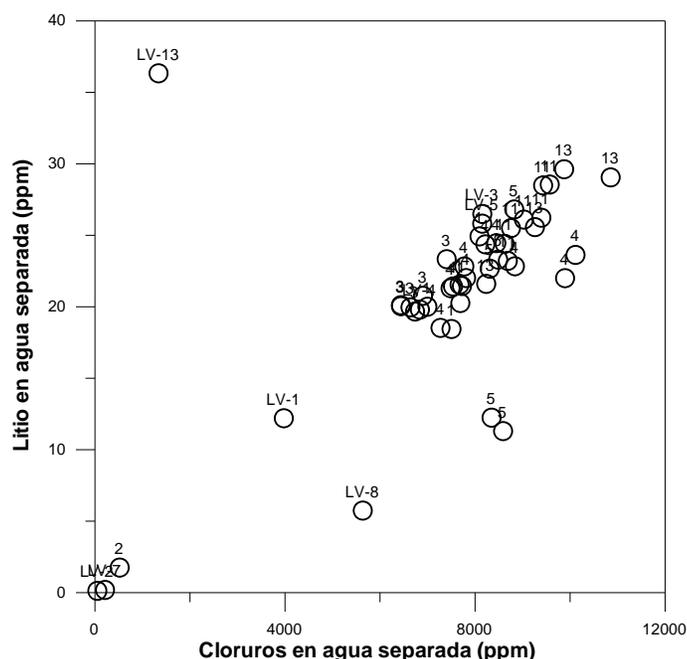


Fig. 5. Li vs Cl en agua separada de pozos de Las Tres Vírgenes.

En la Figura 5 se graficaron datos de promedios anuales de Li vs Cl y de nuevo se observa una tendencia de mezcla, con un coeficiente de correlación de 0.88, con los mismos componentes primarios mencionados.

La evidencia de mezcla se observa también en la Figura 6 donde se graficaron los valores de  $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$  de los fluidos producidos. Aunque se cuenta con datos isotópicos relativamente escasos y no existen datos para el pozo LV-2, se nota una tendencia lineal con pendiente positiva y con un coeficiente de correlación de 0.69. La pendiente positiva indica mezcla de fluidos y los componentes primarios se identifican como las composiciones de los pozos LV-1 y LV-13 representando a los fluidos del yacimiento, y las de los pozos LV-4 (muestra de 2007) y LV-5 como representativos del componente más diluido.

Es importante notar el agotamiento isotópico de más de 5‰ en  $\delta D$  en los pozos LV-4 y LV-11 obtenidos en 2007, con respecto a sus composiciones obtenidas en 2003. Las variaciones en la composición isotópica a través del tiempo indican dilución, ya que las muestras tomadas en 2007 muestran agotamiento isotópico con respecto a datos previos, como sigue. En el pozo LV-4 la disminución en  $\delta^{18} O$  fue de  $\sim 0.7\%$  y en  $\delta D$  fue de más de 5‰ con respecto a 1997; mientras que en el pozo LV-11 las disminuciones fueron de  $\sim 0.6\%$  en  $\delta^{18} O$  y  $\sim 7\%$  en  $\delta D$  con respecto a 2003.

### 3.3 Comportamiento de indicadores geoquímicos a través del tiempo

El comportamiento de los cloruros en los pozos a través del tiempo se observa en la Figura 7. Como puede verse, en todos los pozos las variaciones de cloruros muestran tendencia a decrecer. Por ejemplo, en el pozo

LV-4 los cloruros disminuyeron ~2000 ppm entre 1996 y 2005, mientras que en el pozo LV-11 decrecieron levemente de 2001 a 2005 pero durante 2005-2006 se notan fluctuaciones importantes de cloruros.

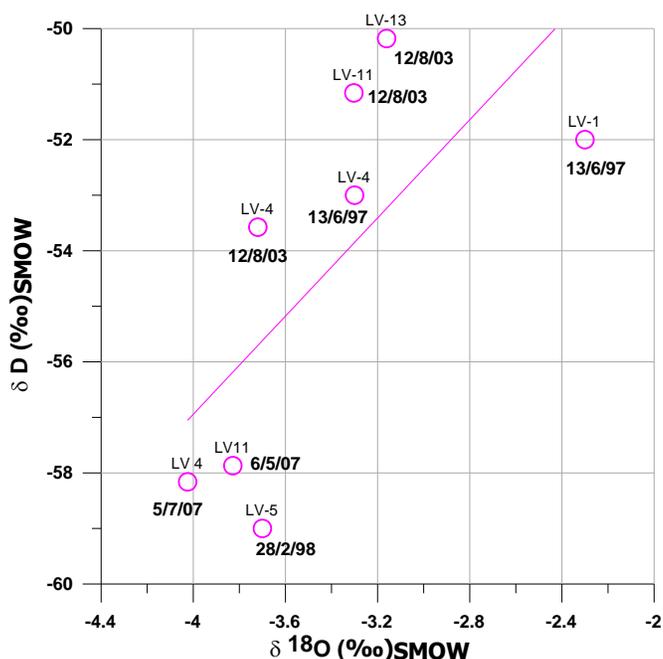


Fig. 6.  $\delta D$  vs  $\delta^{18}O$  en la descarga total de pozos de Las Tres Vírgenes.

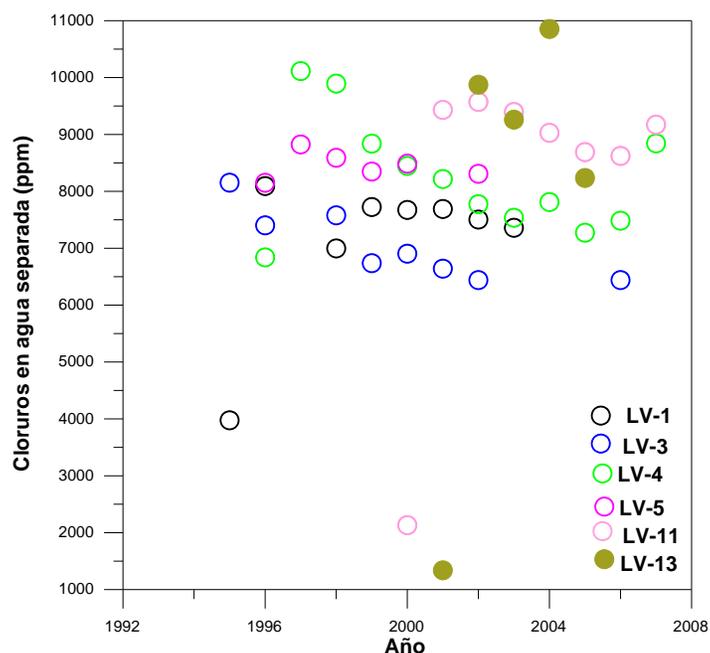


Fig. 7. Concentración de cloruros en agua separada de pozos vs tiempo.

En la Figura 8 se observa que la temperatura de yacimiento disminuyó ~10°C en el pozo LV-1 de 2000 a 2003 mientras que en la Figura 9 en el pozo LV-4 se observan variaciones de temperatura en intervalos cortos de tiempo durante 1999-2005. Posteriormente el pozo se cerró de forma temporal, reiniciándose su operación en 2006, con una recuperación importante de temperatura (de ~20°C) hasta 2007. Las variaciones de cloruros y de temperatura en los pozos de Las Tres Vírgenes a través del tiempo confirman la ocurrencia de procesos de mezcla y dilución sugeridos por el comportamiento de especies químicas e isotópicas.

Con el propósito de investigar los principales procesos de yacimiento y para definir los periodos de tiempo de ocurrencia de los mismos, se utilizó el método de comparación de diversas entalpías de acuerdo al método propuesto por Truesdell *et al.* (1995). En la Figura 10 se muestran las historias de entalpía de la descarga total y de las entalpías estimadas por medio de los geotermómetros de sílice y Na/K para el pozo LV-4. El comportamiento de la entalpía de descarga total de 2001 a 2004 indica más de una entrada de fluidos y ebullición “cercana al pozo” del fluido en su trayecto hacia el pozo, causada por la disminución de la presión de fondo. Como resultado de la ebullición cercana al pozo, la entalpía de la descarga total se incrementa. Al mismo tiempo, el ingreso de fluidos de menor temperatura se identifica por el patrón  $H_{SiO_2} > H_{Na/K}$  debido a que el geotermómetro Na/K es de “respuesta lenta” si se compara con el geotermómetro de sílice, por lo que indica una temperatura previa del fluido. En 2004 el patrón de entalpías:  $H_{descarga\ total} \cong H_{Na/K} \cong H_{SiO_2}$  indica que el pozo produce desde una fase líquida en equilibrio. Debido a la relativamente baja entalpía de la descarga total, se infiere que el proceso de ebullición cercana al pozo ha cesado. Durante 2005 el patrón de entalpías observado es  $H_{SiO_2} > H_{Na/K} = H_{descarga\ total}$ , indicando el ingreso agua de menor temperatura con re-equilibrio de la entalpía Na/K. Este patrón poco usual pudo haber sido inducido por la reducción en el orificio de producción debido a que el pozo estaba en proceso de cierre. Durante 2006 el pozo produjo desde un líquido en equilibrio. En 2007 el patrón de entalpías:  $H_{descarga\ total} = H_{Na/K} > H_{SiO_2}$  muestra la mezcla de agua de menor temperatura cerca del pozo, con líquido equilibrado. Las entalpías de sílice resultan ser más bajas por la dilución de la sílice sin re-equilibrio posterior.

En el pozo LV-11 (Fig. 11) durante 2006 el patrón de entalpías:  $H_{Na/K} > H_{SiO_2} > H_{descarga\ total}$  indica claramente la mezcla en el pozo de agua de menor temperatura con líquido equilibrado mientras que durante 2007 el patrón:  $H_{Na/K} > H_{SiO_2} = H_{descarga\ total}$  resulta de la mezcla con aguas de menor temperatura que ocurre cerca del pozo, con re-equilibrio de la sílice pero no de la entalpía Na/K.

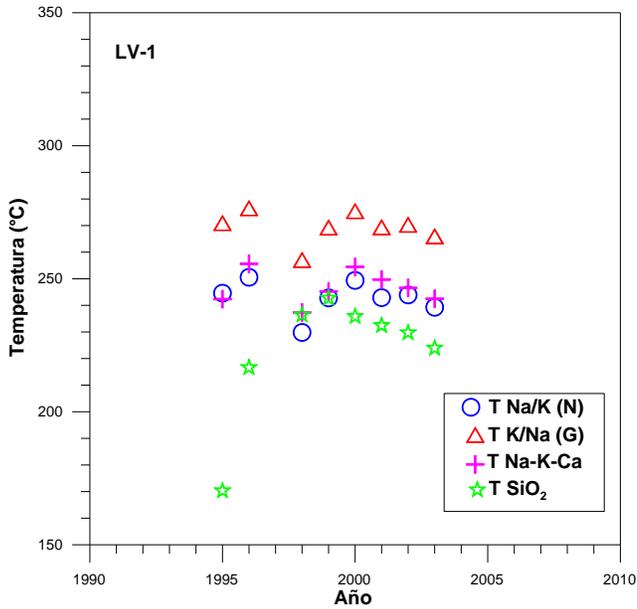


Fig. 8. Estimaciones de temperatura de yacimiento para el pozo LV-1 vs tiempo.

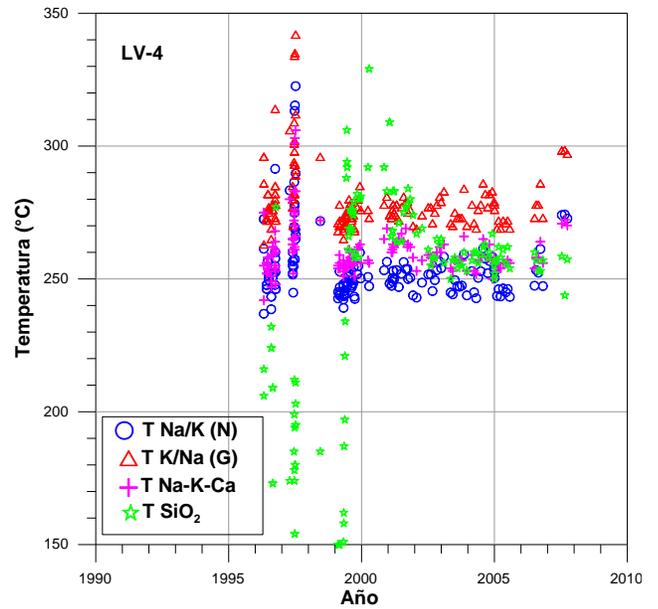


Fig. 9. Estimaciones de temperatura de yacimiento para el pozo LV-4 vs tiempo.

Las historias de las entalpías del pozo LV-13 se muestran en la Figura 12. El patrón general observado  $H_{descarga\ total} > H_{SiO_2} > H_{Na/K}$  indica ebullición cercana al pozo por periodos cortos de tiempo, que corresponden a los incrementos en la entalpía de la descarga total y por el patrón observado hasta 2006:  $H_{SiO_2} > H_{Na/K}$ . También se infiere el fenómeno de mezcla con agua de menor temperatura, cerca del pozo.

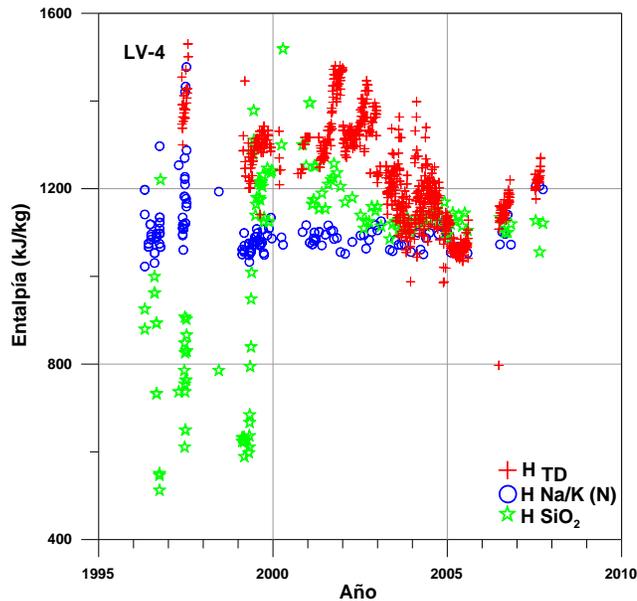


Fig. 10. Entalpía de la descarga total y entalpías Na/K y  $SiO_2$  para el pozo LV-4 vs tiempo.

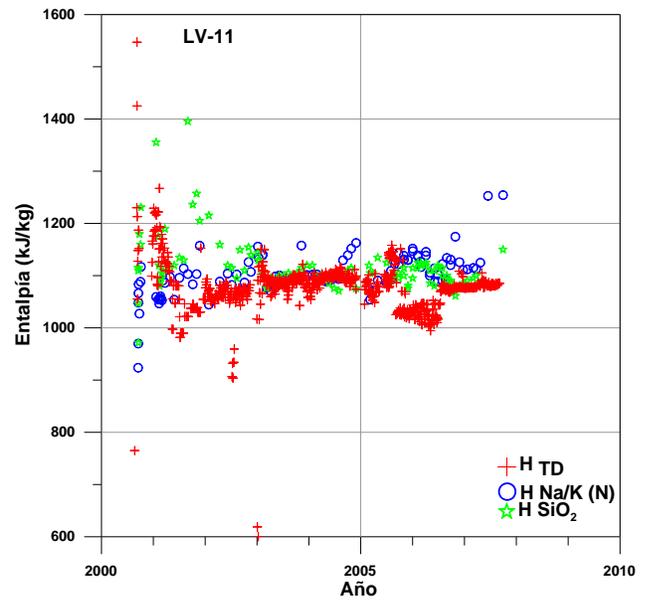


Fig. 11. Entalpía de la descarga total y entalpías Na/K y  $SiO_2$  para el pozo LV-11 vs tiempo.

Los resultados de la investigación de procesos muestran que además de los fenómenos de ebullición en intervalos cortos de tiempo hallados en los pozos LV-4 y LV-11, los procesos más importantes en los pozos estudiados fueron la entrada de agua de menor temperatura y las múltiples entradas de agua a los pozos por periodos de tiempo relativamente largos. Sin embargo, tales procesos no fueron muy severos en el pozo LV-11, el cual, durante 2003-2004 mostró un comportamiento estable.

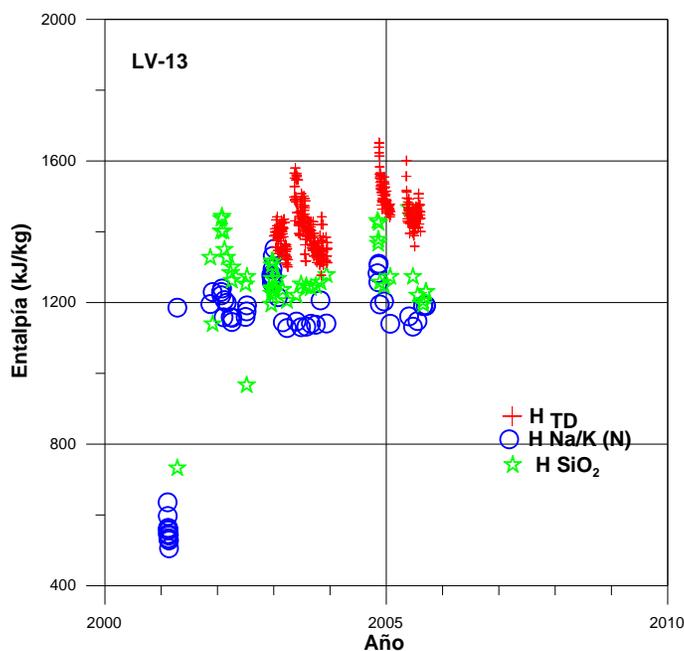


Fig. 12. Entalpía de la descarga total y entalpías Na/K y  $\text{SiO}_2$  para el pozo LV-13 vs tiempo.

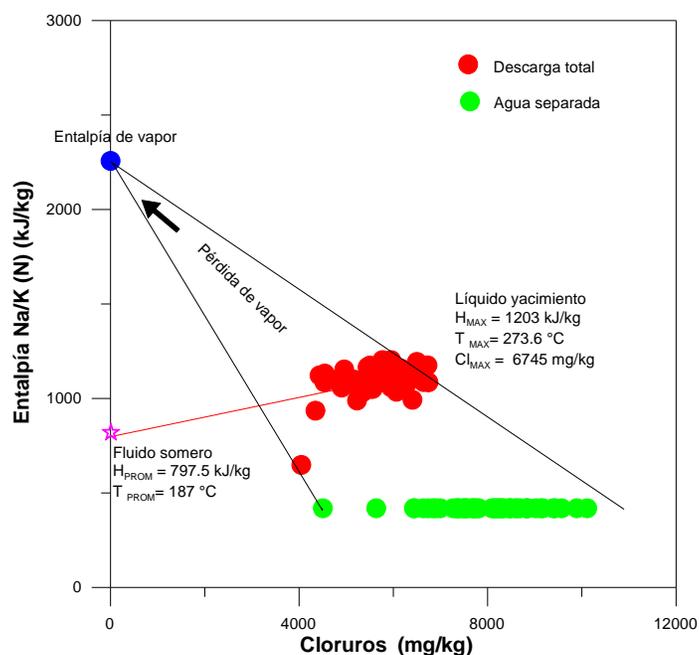


Fig. 13. Modelo de mezcla entalpía-cloruros (Truesdell and Fournier, 1975).

### 3.4 Diagrama Entalpía-Cloruros

Con el propósito de estimar la concentración de cloruros y la temperatura de los componentes primarios de la mezcla de fluidos inferida para los fluidos producidos en Las Tres Vírgenes, se utilizó el diagrama entalpía-cloruros (Truesdell y Fournier, 1975). En la Figura 13 se muestran las entalpías estimadas con el geotermómetro Na/K vs las concentraciones de cloruros en la descarga total (promedios anuales en ambos casos), y como se observa los datos presentan una tendencia lineal entre ambos parámetros. Esta tendencia se debe a la mezcla de fluidos y a partir de ella se puede estimar una entalpía (Na/K) promedio para el fluido del yacimiento de 1203 kJ/kg ( $274^\circ\text{C}$ ) y una concentración de cloruros de 6745 ppm; mientras que para el agua de menor temperatura y salinidad se estima una entalpía (Na/K) de 798 kJ/kg ( $187^\circ\text{C}$ ). La salinidad del agua de dilución parecería ser la del pozo más somero LV-2, es decir de  $\sim 500$  ppm. La temperatura de yacimiento para el pozo LV-2 se estimó entre  $171$ - $202^\circ\text{C}$ . A partir de este resultado se podría establecer que el acuífero somero que alimentó al pozo LV-2 en el pasado se extiende hacia la zona sur, o que un acuífero somero similar está localizado en la zona sur.

## 4. Conclusiones

El análisis de datos geoquímicos de fluidos de pozos de Las Tres Vírgenes sugiere que los fluidos producidos resultan de una mezcla de fluidos constituida por diferentes proporciones de dos componentes primarios. Los resultados también sugieren que los fluidos de menor salinidad y temperatura arriban a los pozos en intervalos de tiempo relativamente largos, lo que apoya la hipótesis de mezcla y dilución. El fluido

característico del yacimiento parece ser similar al producido por el pozo LV-13 (el más profundo) mientras que el fluido de menor temperatura y salinidad se asemeja al que produjo el pozo LV-2 (el más somero).

Debido a que no se identificaron otros componentes en la mezcla y a que las composiciones de los pozos se alinearon en una misma tendencia, independientemente de su localización (norte o sur), se puede plantear que el acuífero somero que alimentó al pozo LV-2 se extiende a la zona sur o que un acuífero similar ocurre en la zona sur. Los resultados de este estudio explican en parte la ocurrencia de incrustaciones en el campo, dado que la mezcla de fluidos favorece el depósito de minerales.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la CFE por proporcionar datos y autorizar esta publicación. Los resultados son parte del proyecto “Respuesta a la explotación del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes” realizado en 2007 por la CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

### Referencias

- Arnórsson S., 1992. Geochemistry and geothermal resources in Iceland. En: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. F. D’Amore (Coordinador) UNITAR/UNDP, pp. 145-196.
- Barragán, R.M., E. Iglesias, R.J. Torres, V.M. Arellano, R. Tapia, P. Hernández, and M. Ramírez, 2010. Chemical modeling of fluids from the Las Tres Vírgenes, B.C.S. (México), geothermal field. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-30 April 2010.
- Bethke, C.M., 1996. *Geochemical reaction modeling. Concepts and applications*. Oxford University Press, Oxford, U.K. 397 p.
- Flores-Armenta, M., and G. Jaimes-Maldonado, 2001. The Las Tres Vírgenes Mexico geothermal reservoir. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp. 525-534.
- Fournier, R.O., and A.H. Truesdell, 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, pp. 515-525.
- Fournier, R.O., and R.W. Potter II, 1982. A revised and expanded silica (Quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, Nov. 1982, pp. 3-12.
- Giggenbach, W.F., 1992. Chemical techniques in geothermal exploration. In: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. F. D’Amore (Coordinador) UNITAR/UNDP, pp. 119-144.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 31, pp. 167-172.
- Iglesias, E.R., R.M. Barragán, R.J. Torres y N. Reyes, 2007. Estudio de la respuesta a la explotación del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B. C. S. Informe IIE/11/13361/I 02F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, para la Comisión Federal de Electricidad, 143 p. Inédito.
- Nieva, D., and R. Nieva, 1987. Developments in geothermal energy in Mexico-Part Twelve. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *Heat Recovery Systems & CHP*, v. 7, pp. 243-258.

- Portugal E., P. Birkle, R.M. Barragán, V.M. Arellano, E. Tello, and M. Tello, 2000. Hydrochemical-isotopical and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101, pp. 223-244.
- Truesdell, A.H., 1998. Report on a geochemical conceptual model for Las Tres Vírgenes geothermal field. *Informe interno para Comisión Federal de Electricidad*, 16 p. Inédito.
- Truesdell, A.H., and R.O. Fournier, 1975. Calculation of deep reservoir temperatures from chemistry of boiling hot springs of mixed origin. *2<sup>nd</sup> United Nations Symposium on the Development and use of geothermal resources*, San Francisco, Abstract, Vol. III-25.
- Truesdell, A.H., M.J. Lippmann, J.L. Quijano, F. D'Amore, 1995. Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, May 1995, pp. 1933-1938.

# Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

*Álvaro Aguilar Dumas*

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General Cerro Prieto, Mexicali, México. Correo: [alvaro.aguilar@cfe.gob.mx](mailto:alvaro.aguilar@cfe.gob.mx)

---

---

## Resumen

Actualmente el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se enfrenta a problemas relacionados con la baja de producción de vapor, debido principalmente a una disminución de la presión, la entalpía y la temperatura, lo cual se debe a la sobreexplotación del recurso geotérmico. En este trabajo se analiza la situación actual del CGCP y se proponen zonas alternas de exploración y explotación que pudieran, en un momento dado, compensar la declinación en la producción de vapor que actualmente se observa en el campo. Una de estas zonas es Tulecheck, que es un área con gran potencial geotérmico que actualmente se encuentra en exploración mediante geofísica para su posterior perforación. La otra zona es la parte oriental del CGCP, entre los ejidos Nuevo León y Saltillo, la cual tiene un potencial probado y representa la continuidad al noreste del yacimiento geotérmico que actualmente está en explotación. Una vez que estas zonas se prueben de manera satisfactoria, el CGCP pasaría a formar parte de una serie de módulos de generación, independientes unos de otros.

*Palabras clave:* Cerro Prieto, declinación de la producción de vapor, zonas adicionales para explotación, Tulecheck.

## Current status and alternatives for exploration and exploitation in the Cerro Prieto geothermal field, BC

### Abstract

Currently the Cerro Prieto geothermal field (CGCP) has problems related to low steam production, mainly due to pressure, enthalpy, and temperature drops, which in turn come from over-exploiting the geothermal resource. This paper analyses the current situation and proposes alternative zones for exploration and exploitation. These could compensate for the present steam-production decline. One zone is Tulecheck, an area with large geothermal potential now undergoing geophysical surveys. The other is the eastern portion of the CGCP, between the Nuevo León and Saltillo ejidos, which holds proven potential and is the northeastern prolongation of an area of the geothermal reservoir currently under exploitation. When these zones are proven satisfactorily, the CGCP reservoir would become a series of independent-generation modules.

*Keywords:* Cerro Prieto, steam production declination, additional zones for exploitation, Tulecheck.

---

---

### Objetivo

Proponer áreas aledañas susceptibles de contener recursos geotérmicos, a partir del análisis de la situación actual del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), localizadas en la Cuenca de Salton, que es la prolongación sur de la zona geotérmica del Valle Imperial, en Estados Unidos.

## 1. Introducción

El CGCP contiene un yacimiento geotérmico de líquido dominante, alojado en un ambiente sedimentario. Está ubicado en una cuenca de tipo *pull-apart*, formada por los sistemas de fallas Cerro Prieto e Imperial, los cuales forman parte del sistema de fallas de San Andrés.

El CGCP empezó operaciones comerciales en 1973, y a partir de esa fecha se ha extraído vapor geotérmico que se distribuye a las diferentes centrales generadoras. Actualmente tiene una capacidad instalada de 720 MW para cuya generación se requieren aproximadamente 5800 toneladas por hora (t/h) de vapor. Existen actualmente un total de 353 pozos perforados en el CGCP, de los cuales un promedio anual de 164 se encuentran integrados a los procesos productivos de las diferentes centrales generadoras.

El campo se encuentra en el estado mexicano de Baja California, 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 115° 12' y 115° 18' longitud oeste y los paralelos 32° 22' y 32° 26' de latitud norte (Fig. 1).



Fig. 1. Ubicación del CGCP.

Geológicamente, el CGCP se localiza dentro de la Cuenca de Salton, que se extiende desde el Valle Imperial, al sureste de California en Estados Unidos hasta el Valle de Mexicali, al noreste del estado de Baja California, México. La cuenca, sísmicamente activa, presenta una depresión estructural formando una extensión continental del Golfo de California, pero rellenada parcialmente con sedimentos del Río Colorado. El golfo y la cuenca se sitúan a lo largo del *rift* continental que separa la placa del Pacífico, hacia el oeste, de

la placa Norteamericana al este, generando sistemas de gran actividad magmático-hidrotermal en los centros de apertura y extensión (*pull-apart*) que se han desarrollado en la cuenca, favoreciendo la formación de sistemas geotérmicos de alta temperatura como el CGCP en el Valle de Mexicali y el campo geotérmico de Salton Sea, en el Valle Imperial.

El sistema geotérmico de Cerro Prieto está delimitado por las fallas Imperial y Cerro Prieto. Areniscas terciarias, con alta permeabilidad primaria, intercaladas en lutitas son las rocas almacenadoras del fluido. La Figura 2 muestra el modelo conceptual del yacimiento.

La explotación comercial del campo empezó en 1973, al ponerse en marcha las primeras unidades de la central Cerro Prieto I (CP-I). El potencial del yacimiento geotérmico ha permitido un gran desarrollo del campo, expandiendo el área productiva e incrementando la capacidad instalada, alcanzando 720 MW desde el año 2000, con las centrales CP-I (180 MW), CP-II (220 MW), CP-III (220 MW) y CP-IV (100 MW).

## 2. Situación actual

Desde 1973 se han extraído aproximadamente 2900 millones de toneladas de mezcla en un área de explotación de 18 km<sup>2</sup>. En años anteriores cada incremento en la cantidad de pozos significaba mayor producción de vapor, pero actualmente la producción de vapor mantiene una tendencia a la baja debido principalmente a la sobreexplotación a la que está sometido el yacimiento (Fig. 3).

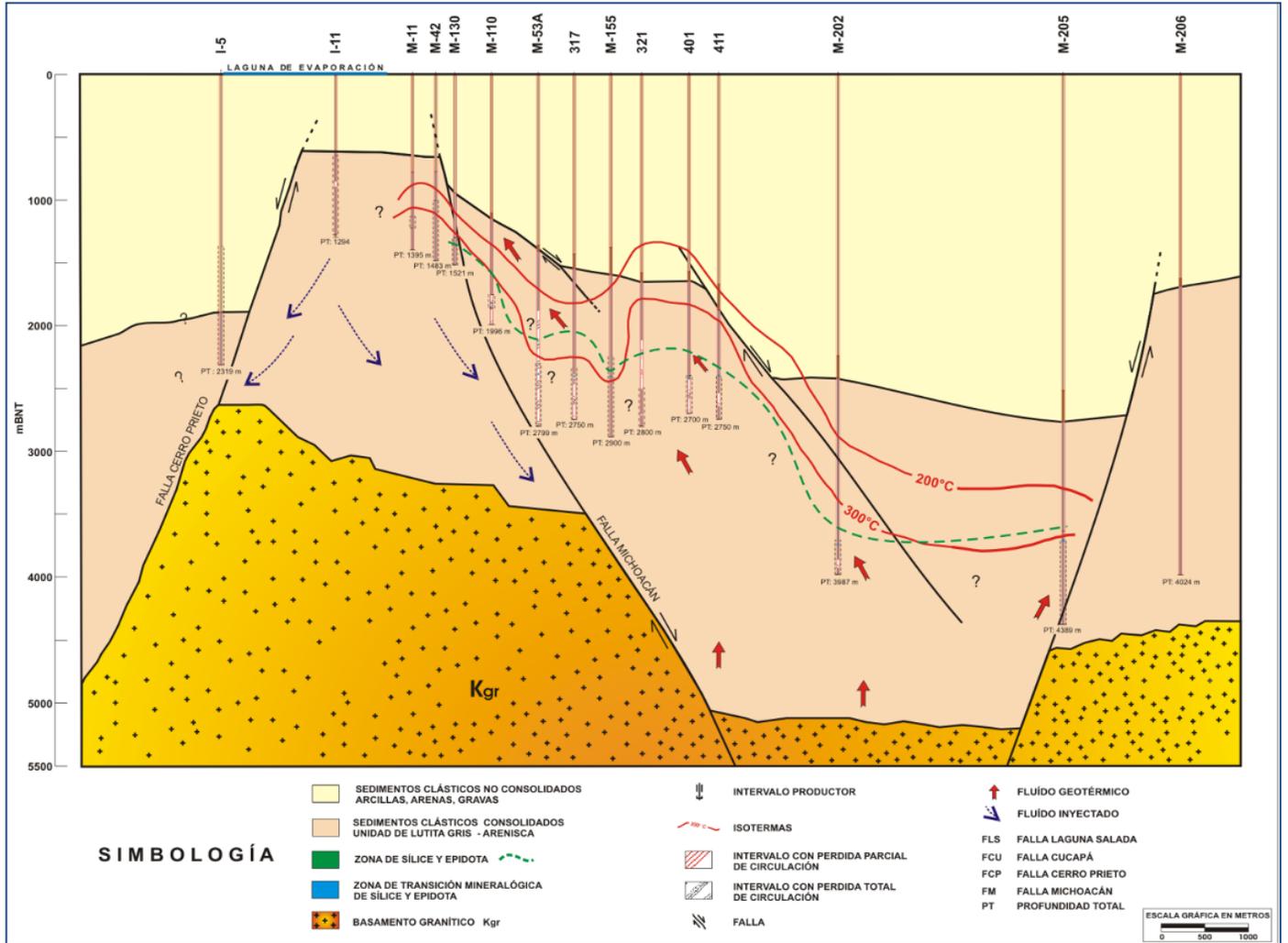


Fig. 2. Modelo conceptual del yacimiento geotérmico en Cerro Prieto.

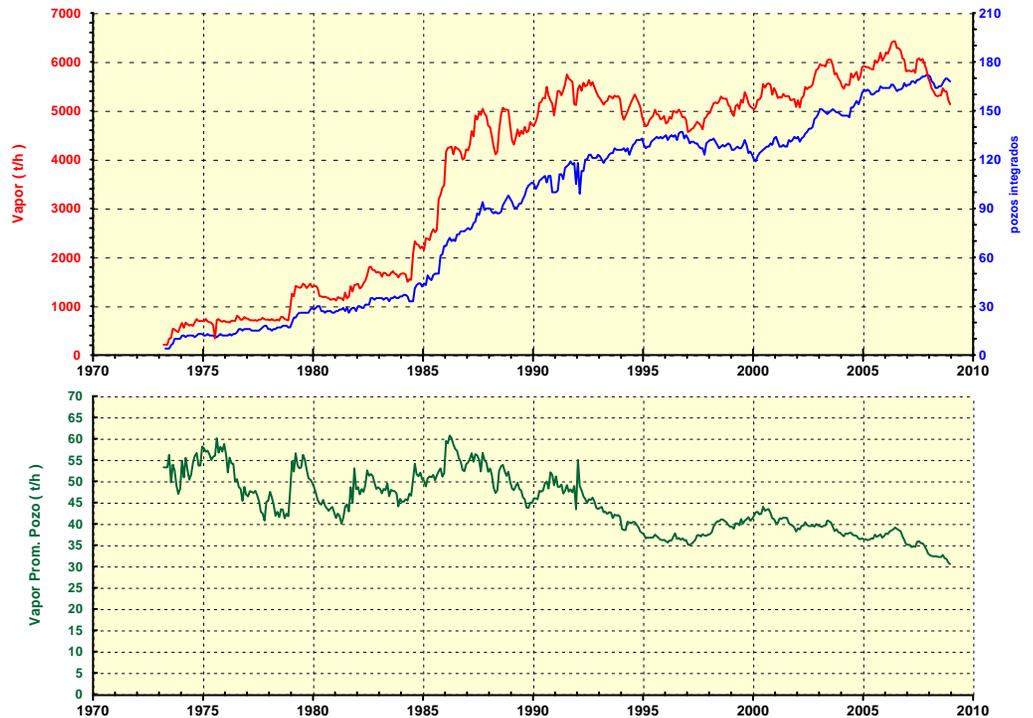


Fig. 3. Tendencia histórica de producción de vapor y número de pozos integrados (arriba) y producción promedio de vapor por pozo (abajo).

Como se observa en la parte inferior de la Figura 3, la producción promedio por pozo integrado ha descendido de unas 55 t/h de vapor en 1975 a poco más de 30 t/h en 2009.

### 3. Áreas propuestas

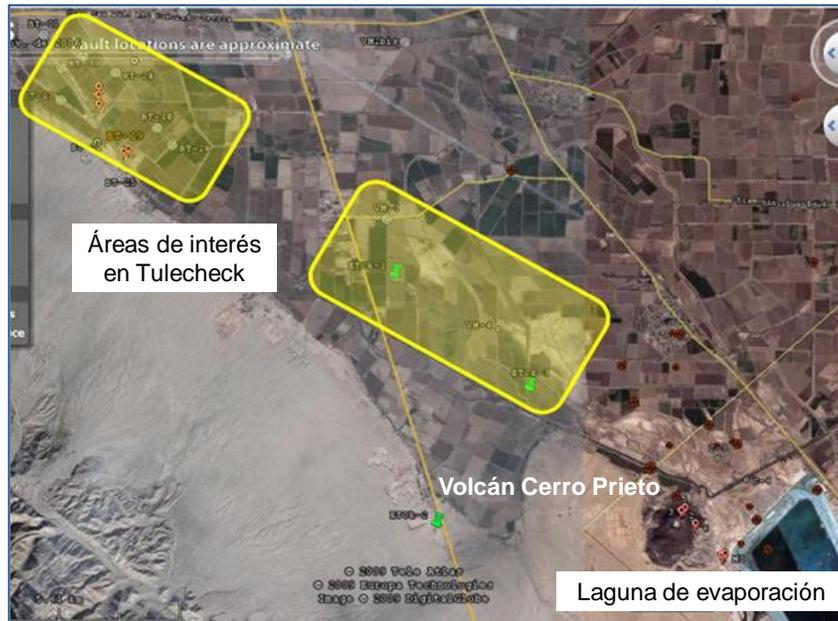


Fig. 4. Ubicación de la zona de Tulecheck y de sus áreas de interés.

con lo que se exploró un área aproximada de 36 km<sup>2</sup>.

En 1982 se perforaron cinco pozos con profundidades entre 962 y 1624 m. El más profundo de ellos, TC-2, alcanzó el basamento granítico a 1540 m de profundidad y registró temperaturas de fondo de 92°C. El pozo más caliente, BT-30, terminado en sedimentos a 1260 m, registró temperaturas de 165°C.

Actualmente se cuenta con un plano gravimétrico de anomalías de Bouguer realizado a principios de los años 80, un plano de anomalías magnéticas de campo total (Mexicali I11-12, Servicio Geológico Mexicano) y con los resultados del estudio de resistividad con transitorio electromagnético encargado por la CFE en 2008 (Ramírez, 2008). En 2009 se llevó a cabo el complemento del estudio de resistividad y un monitoreo sísmico del área, con el fin de asegurar las mejores localizaciones para tres futuros pozos exploratorios programados para perforarse en 2010-2011.

La zona de Tulecheck se considera propicia para contener recursos geotérmicos con los que se puede generar energía por medio de ciclo binario. Algunos autores consideran que podría encontrarse un yacimiento geotérmico más grande que el conocido en Heber (Elders *et al.*, 1993).

Los pozos exploratorios propuestos se localizan en los sitios ETCK-1, ETCK-2 y ETCK-3, ubicados con base en los resultados del estudio de resistividad con transitorio electromagnético realizado por la CFE (2008). El sitio ETCK-1 se localizará en el sondeo TKTE-105 (Perfil P-17, Fig. 5); estructuralmente el pozo estará en un graben y al aplomo de flujos ascendentes de fluidos de alta temperatura que provienen de profundidades mayores a los 2000 m a través de fallas normales; por las resistividades bajas presentes entre los 1500 y 2000 m es muy posible que en el contacto entre el paquete de los Sedimentos Clásticos Consolidados y el Basamento Granítico (ver Fig. 2) se aloje un acuífero de alta temperatura (Ramírez, 1994).

#### 3.1. Tulecheck

Esta zona, localizada al noroeste del CGCP (Fig. 4), presenta manifestaciones termales con temperaturas medidas en superficie entre 53 y 93°C. El geotermómetro Na-K-Ca indica temperaturas de equilibrio entre 159 y 230°C.

En 1958 se realizó un estudio sobre las manifestaciones hidrotermales, que se llamaron Dren Tulecheck y Dren Huisteria, en el cual se registraron temperaturas superficiales de 60-76°C y de 88-103°C, respectivamente. En 1978, apoyados en estudios geofísicos, la CFE perforó 12 pozos poco profundos, en promedio de 102 m, y otro denominado BT-26 con una profundidad de 800 m,

El Sitio ETCK-2 se ubica en el sondeo TKTE-182. De acuerdo a la interpretación estructural también se ubica en un graben. De los tres perfiles de resistividad que cubren este sitio, sólo uno presenta un flujo tabular ascendente de fluidos de alta temperatura, por lo que puede tratarse de una zona muy local sin extensión a profundidad (Ramírez, 2008). Por ello habrá que esperar a efectuar sondeos TEM con una mayor cobertura para confirmar la ubicación propuesta para este pozo exploratorio.

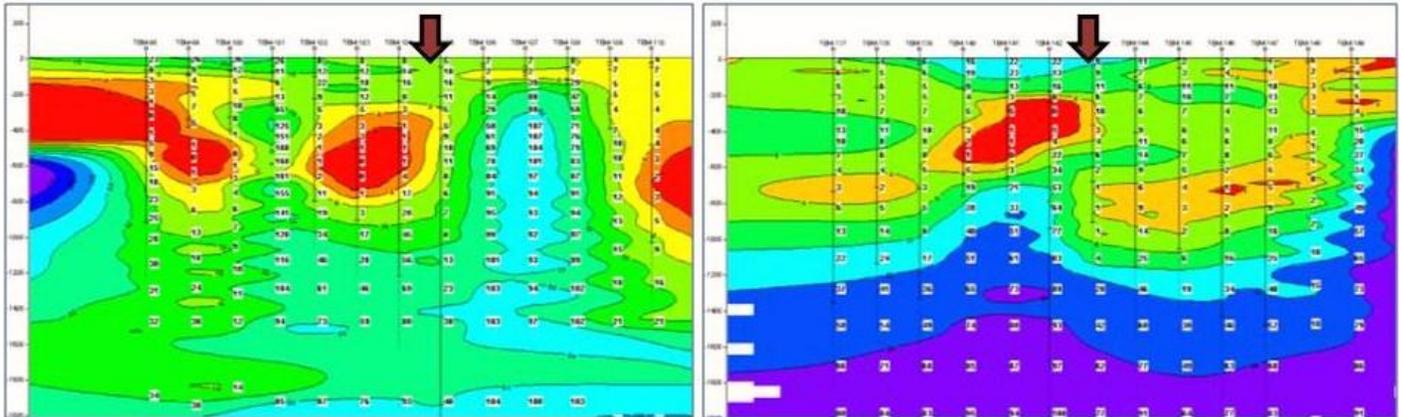


Fig. 5. Perfiles de resistividad P-17 (izquierda) y P-11 (derecha) mostrando la localización de dos de los pozos exploratorios propuestos (ETCK.1 flecha izquierda) y ETCK-3 (flecha derecha).

El sitio ETCK-3 se ubica en el sondeo TKTE-143 (perfil P-11, Fig. 5), y al igual que los anteriores se interpretó ubicado en un graben al aplomo de un flujo tabular de fluidos de alta temperatura. Es muy posible que tanto en este sitio como en el primero no haya manifestaciones termales superficiales, pero esto puede deberse a la cubierta resistiva superficial y al espesor considerable de los Sedimentos Clásticos No Consolidados que actúan como sello para los fluidos de alta temperatura. La zona favorable se espera igualmente en el contacto entre los Sedimentos Clásticos Consolidados y el basamento granítico, por el mismo argumento descrito para el sitio ETCK-1.

Por otro lado, estudios gravimétricos realizados en el Valle Imperial (Biehler, 1964) demostraron que la anomalía de Bouguer, además de sugerir la forma y tendencia regional del espesor sedimentario y de las estructuras principales, en algunos casos los máximos tienen una estrecha relación con zonas de altas temperaturas. Esta interpretación, en combinación con los resultados de magnetometría y resistividad, dio como resultado el descubrimiento de ocho regiones geotérmicas en territorio norteamericano, denominadas Salton Sea, Heber, East Mesa, North Brawley, East Brawley, Glamis, Dunnes y Border, todas ellas ubicadas en un máximo gravimétrico. Solamente una de esas zonas, la de Salton Sea, presentaba evidencias de termalismo superficial.

El CGCP también se encuentra en un máximo gravimétrico (Velasco, 1963), y existe otro aproximadamente al oeste del Ejido Michoacán y al sureste del área de Tulecheck, lo que parece ratificar la importancia de esta zona.

### 3.2. Parte oriental de la Sierra Cucapá

A 8 km al S 43° W del volcán Cerro Prieto (VCP), en la parte oriental de la Sierra Cucapá (SC) se localiza una manifestación hidrotermal de vapor (Calderón, 1958), cuya posición geográfica hace suponer que la Falla Cucapá es conductora de fluidos en esta parte de la sierra.

Los trabajos realizados en esta área se enfocaron a colectar una muestra del condensado de vapor, la cual se analizó reportando un pH de 1, un total de 31,150 ppm de sólidos totales disueltos (STD) y un contenido de HCO<sub>3</sub> de 0.643 ppm.

La manifestación está formada por una protuberancia de 2.80 m de altura, formada por el material de acarreo que ha pasado por los orificios que forman dicha manifestación (Calderón, 1958).

### 3.3. Parte oriental del campo, entre los Ejidos Nuevo León y Saltillo

Entre 1983 y 1986 la CFE realizó diversos estudios exploratorios en la porción oriental y fuera de la actual zona de explotación, incluyendo la perforación de pozos exploratorios a profundidades de 2840 a 4390 m. Como resultado se identificó la extensión del yacimiento geotérmico hacia dicha zona y se determinó su factibilidad para aprovecharse en la generación de electricidad. Asimismo, con la construcción del pozo M-206, ubicado al este de la Falla Imperial, se comprobó que esta falla es el límite oriental del yacimiento.

Sin embargo, en los años 80 se continuaban desarrollando las zonas de CP-II y CP-III, y esa porción oriental se consideró como reserva para desarrollarse en el futuro. Por lo tanto, tomando en cuenta la necesidad actual de vapor en el campo, se propone re-evaluar los pozos exploratorios M-201, M-203 y M-205 con el propósito de implementar acciones para incorporar la zona este al proceso productivo. Las características y situación actual de esos pozos se presentan en la Tabla 1.

Pozo	Profundidad (m)	T (°C)	Inducción	Tipo o Condición
201	3817	>300	No	Monitoreo
202	3712	>300	Fluyó de 1984 a 1985	Cerrado
203	3993	285	Fluyó de 1984 a 1986	Monitoreo
204	4120	<200	No	Cerrado
205	4389	>300	Sin éxito	Monitoreo
206	4024	<200	No	Cerrado
208	2406	<100	No	Cerrado

Tabla 1. Resumen de los pozos exploratorios en la porción oriental del CGCP.

Considerando que hay argumentos suficientes para asegurar que el yacimiento geotérmico se extiende hasta la Falla Saltillo, se proponen tres proyectos de generación independientes uno de otro, que se denominan como Proyecto Nuevo León 1 (PNL1) en una extensión de 100 hectáreas, Proyecto Nuevo León 2 (PNL2) en una superficie de 75 hectáreas y Proyecto Saltillo (PS) en otras 100 hectáreas, que en conjunto podrían generar 125 MW (Fig. 6).

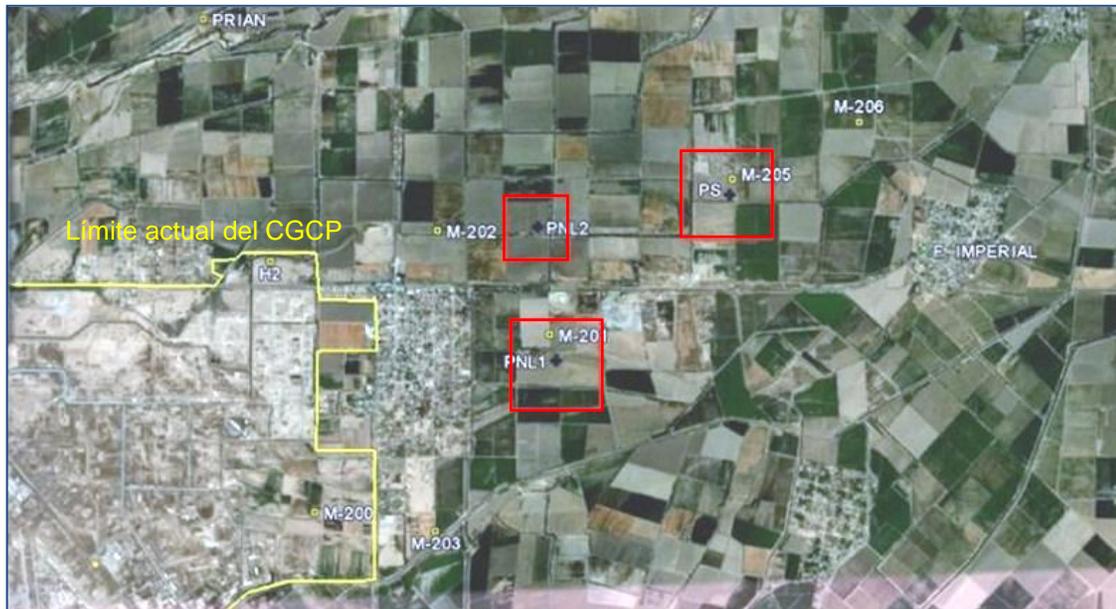
En estas áreas se pueden perforar pozos con 300 m de separación entre sí y a profundidades de hasta 4200 m. Mediante pozos direccionales, se tendría la oportunidad de alcanzar zonas incluso fuera de ellas. La propuesta es contar con sistemas de inyección en caliente y de aprovechamiento de la energía residual mediante plantas de ciclo binario.

De esta manera, en un futuro el CGCP podría estar constituido por módulos separados incluyendo al campo actual y a los módulos PNL1, PNL2, PS, la zona de Tulecheck, la de la Sierra de Cucapá, y probablemente otras zonas aún no detectadas hasta ahora, generando no sólo con vapor sino con fluidos de baja temperatura mediante plantas de ciclo binario, y probablemente combinada con energía solar.

## 4. Conclusiones

El yacimiento geotérmico de Cerro Prieto es un yacimiento finito que se encuentra en una etapa de madurez y que abarca desde la Falla Cerro Prieto hasta la Falla Imperial. La expansión del yacimiento hacia el oriente se encuentra limitada actualmente por el Ejido Nuevo León.

Hay dos factores principales que definen la situación actual del CGCP: (i): La declinación del yacimiento geotérmico explotado hasta la fecha, debido a una sobreexplotación, y (ii) un área limitada para la perforación de nuevos pozos.



*Fig. 6. Ubicación de pozos exploratorios actuales al oriente del CGCP y de las tres áreas propuestas (PNL1: Proyecto Nuevo León 1, PNL2: Proyecto Nuevo León 2, y PS: Proyecto Saltillo).*

Al ritmo de perforación actual y considerando los terrenos que recientemente se negociaron mediante contratos de usufructo, queda una superficie suficiente para perforar pozos nuevos hasta el año 2017, con una separación entre pozos de 300 m. Pero después de este año la producción de vapor bajará paulatina e inevitablemente hasta una 3600 t/h, que es el pronóstico de equilibrio del yacimiento.

Por ello, en la parte oriental del CGCP, entre los ejidos Nuevo León y Saltillo, se están proyectando tres islas de generación independientes una de otra (PNL1, PNL2 y PS), con un potencial de generación de 125 MW.

En la Zona Geotérmica de Tulecheck, se proyecta un potencial de 10 MW con plantas de ciclo binario, pero podría incrementarse considerablemente de comprobarse las anomalías en la parte sureste del área.

## Referencias

- Biehler, S., 1964. Geophysical Study of the Salton Trough of Southern California. Ph D. Thesis, California Institute of Technology, California, EUA. Inédito.
- Calderón G., A., 1958. Estudio Preliminar Geológico del Área al Sur y Sureste de Mexicali, B.C., para aprovechar los Recursos Geotérmicos. Informe de GEOCA (Geólogos Consultores Asociados) para CFE. Inédito.
- Elders, W.A., H. Campbell, R. Carreón, 1993. Direct Use Potential of the Tulecheck Geothermal Area, B.C., México. Convenio de investigación entre la UABC, Mexicali, México y la UCR, Riverside, EUA. Inédito.
- Ramírez, J., 1994. Estudio Gravimétrico de la zona Geotérmica de Laguna Salada, B.C. Reporte técnico final del Instituto de Ingeniería de la UABC para la CFE. Inédito.

Ramírez, J., 2008. Estudio de Resistividad con Transitorio Electromagnético en la Zona Geotérmica de Tulecheck, B.C. Reporte Técnico Final del Convenio DEX-DGF-TK-15-08. Instituto de Ingeniería, Grupo Ciencias de la Tierra, UABC. Inédito.

Velasco H., J., 1963. Levantamiento Gravimétrico Zona Geotérmica de Mexicali, Baja California. Publicación del Consejo de Recursos Naturales No Renovables.

# Thermo-poroelasticity in geothermics, formulated in four dimensions

*Mario César Suárez-Arriaga*

Facultad de Ciencias, Universidad Michoacana, Edificio B, Cd. Universitaria, 58060 Morelia, Mich., México. Correo: [mcsa50@gmail.com](mailto:mcsa50@gmail.com)

---

## Abstract

Rocks in geothermal systems are porous, compressible, and elastic. The presence of a moving fluid in a porous rock modifies its mechanical responses. Rock elasticity is evidenced by the compression resulting from the decline of fluid pressure, which can decrease pore volume. This reduction can be the principal source of fluid released from storage. Poroelasticity explains how the water inside the pores bears a portion of the total load supported by a porous rock. The remaining part of the load is supported by the rock-skeleton, made up of solid volume and pores, which is treated as an elastic solid with a laminar flow of pore fluid coupled to the framework by equilibrium and continuity conditions. A rock mechanics model is a group of equations capable of predicting the porous medium deformation under different internal and external forces of mechanic and thermal origin. This paper introduces an original tensorial formulation for both, the Biot's classic theory (1941) and its extension to non-isothermal processes, including the deduction of experimental thermo-poroelastic parameters supporting that theory. By defining a total stress tensor in four dimensions and three basic poroelastic coefficients, it is possible to deduce a system of equations coupling two tensors, one for the bulk rock and one for the fluid. The inclusion of the fourth dimension is necessary to extend the theory of solid linear elasticity to thermo-poroelastic rocks, taking into account the effects of both the fluid and solid phases and the temperature changes. In linear thermo-poroelasticity, we need five poroelastic modules to describe the relation between strains and stresses. Introducing three volumetric thermal-dilation coefficients, one for the fluid and two for the skeleton, a complete set of parameters for geothermal poroelastic rocks is obtained. The introduction of Gibbs free enthalpy as a thermodynamic potential allows include easy inclusions of thermal tensions. This tensor four-dimensional formulation is equivalent to the simple vector formulation in seven dimensions, and makes more comprehensible and clarifies the linear thermo-poroelastic theory, rendering the resulting equations more easily solved using the Finite Element Method. To illustrate the practical use of this tensor formulation, some applications are outlined: a) full deduction of the classical Biot's theory coupled to thermal stresses, b) how tension changes produce fluid pressure changes, c) how any change in fluid pressure or in temperature or in fluid mass can produce a change in the volume of the porous rock, and d) how the increase of pore pressure and temperature induces rock dilation. The high sensitivity of some petro-physical parameters to any temperature changes is shown, and some cases of deformation in overexploited aquifers are presented, as well.

*Keywords:* Geothermal reservoir modeling, rock elasticity, thermo-poroelasticity, tensor four-dimensional formulation, Biot's theory.

## La termoporoelasticidad en geotermia, definida en cuatro dimensiones

### Resumen

Las rocas en reservorios geotérmicos son porosas, compresibles y elásticas. La presencia de un fluido en movimiento dentro de los poros y fracturas modifica su respuesta mecánica. La elasticidad de la roca se evidencia por la compresión que resulta de la declinación en la presión del fluido, la cual reduce el volumen de los poros. Esta reducción del volumen del poro puede ser la principal fuente de liberación del líquido

almacenado en la roca. La poroelasticidad explica cómo el líquido dentro de los poros soporta una porción de la carga que actúa sobre las rocas porosas. La parte restante de la carga total es soportada por el llamado esqueleto rocoso, formado por el volumen sólido y los poros. El esqueleto es tratado como un sólido elástico acoplado al flujo laminar de un fluido que obedece ciertas condiciones de equilibrio y continuidad. Un modelo de mecánica de rocas es un grupo de ecuaciones capaz de predecir la deformación de la roca porosa sometida a diferentes fuerzas internas y externas, mecánicas y térmicas. Este documento introduce una formulación tensorial original de la teoría clásica de Maurice Biot (1941) y su extensión a procesos no isotérmicos incluyendo la deducción completa de los parámetros termo-poro-elásticos que apoyan la teoría. Definiendo un tensor total de esfuerzos en cuatro dimensiones y tres coeficientes poroelásticos, es posible deducir un sistema de ecuaciones acoplando dos tensores, uno para el esqueleto y otro para el fluido. La inclusión de la cuarta dimensión es necesaria para ampliar la teoría de sólidos lineales elásticos a rocas termoporoelásticas, teniendo en cuenta el efecto conjunto de ambas fases, el fluido, el sólido y los cambios de temperatura. En termoporoelasticidad lineal, se necesitan cinco módulos poroelásticos para describir las funciones entre deformaciones y esfuerzos. Introduciendo tres coeficientes térmicos de dilatación volumétrica, uno para el fluido y dos para el esqueleto, se obtiene un conjunto completo de parámetros para rocas geotérmicas termoporoelásticas. La introducción de la entalpía libre de Gibbs como un potencial termodinámico, permite incluir fácilmente las tensiones térmicas. Esta nueva formulación tensorial en cuatro dimensiones es equivalente a una formulación vectorial simple en siete dimensiones y vuelve más comprensible y clara la teoría lineal termoporoelástica. Las ecuaciones resultantes se resuelven de manera más conveniente usando el método de elementos finitos. Para ilustrar el uso práctico de esta formulación tensorial se presentan algunas aplicaciones: a) la deducción completa de la teoría clásica de Biot acoplada a tensiones térmicas, b) cómo los cambios de tensión producen cambios en la presión del fluido, c) cómo los cambios en la presión del fluido o en la temperatura o en el contenido de masa fluida producen cambios en el volumen de la roca porosa, d) cómo cualquier aumento en la presión de poro o en la temperatura induce una dilatación de la roca. Se muestra la extrema sensibilidad de algunos parámetros petrofísicos a cualquier cambio de temperatura y se presentan casos de deformación de acuíferos sobreexplotados.

*Palabras clave:* Modelado de yacimientos geotérmicos, elasticidad de las rocas, termo-poroelasticidad, formulación tensorial en cuatro dimensiones, teoría de Biot.

---

---

## Introduction

Several factors affect the geomechanical behavior of porous crustal rocks containing fluids: porosity, pressure, and temperature, characteristics of the fluids, fissures, and faults. Rocks in underground systems (aquifers, geothermal and hydrocarbon reservoirs) are porous, compressible, and elastic. The presence of a moving fluid in the porous rock modifies its mechanical response. Its elasticity is evidenced by the compression that results from the decline of the fluid pressure, which can shorten the pore volume. This reduction of the pore volume can be the principal source of fluid released from storage. A rock mechanics model is a group of equations capable of predicting the porous medium deformation under different internal and external forces. In this paper, we present an original four-dimensional tensorial formulation of linear thermo-poroelasticity theory. This formulation makes more comprehensible the linear Biot's theory, rendering the resulting equations more convenient to be solved using the Finite Element Method. To illustrate practical aspects of our model some classic applications are outlined and solved.

## Experimental Background

In classic elastic solids only the two Lamé moduli, ( $\lambda$ ,  $G$ ) or Young's elastic coefficient and Poisson's ratio ( $E$ ,  $\nu$ ), are sufficient to describe the relations between strains and stresses. In poroelasticity, we need five poroelastic moduli for the same relationships (Bundschuh and Suárez-Arriaga, 2010), but only three of these

parameters are independent. The Biot's field variables for an isotropic porous rock are the stress  $\sigma$  acting in the rock, the bulk volumetric strain  $\varepsilon_B$ , the pore pressure  $p_f$  and the variation of fluid mass content  $\zeta$ . The linear relations among these variables are the experimental foundations of Biot's poroelastic theory (Biot & Willis, 1957; Wang, 2000):

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma}{K_B} + \frac{p_f}{H}, \quad \zeta = \frac{\sigma}{H} + \frac{p_f}{R} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \varepsilon_B \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_B & H^{-1} \\ H^{-1} & R^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma \\ p_f \end{pmatrix} \quad (1)$$

Where  $K_B$ ,  $H$ , and  $R$  are poroelastic coefficients that are experimentally measured as follows (Wang, 2000):

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta V_B}{V_B}, \quad C_B = \left( \frac{\Delta \varepsilon_B}{\Delta \sigma} \right)_{p_f}, \quad K_B = \frac{1}{C_B}, \quad \frac{1}{H} = \left( \frac{\Delta \varepsilon_B}{\Delta p_f} \right)_{\sigma} = \left( \frac{\Delta \zeta}{\Delta \sigma} \right)_{p_f}, \quad \frac{1}{R} = \left( \frac{\Delta \zeta}{\Delta p_f} \right)_{\sigma} \quad (2)$$

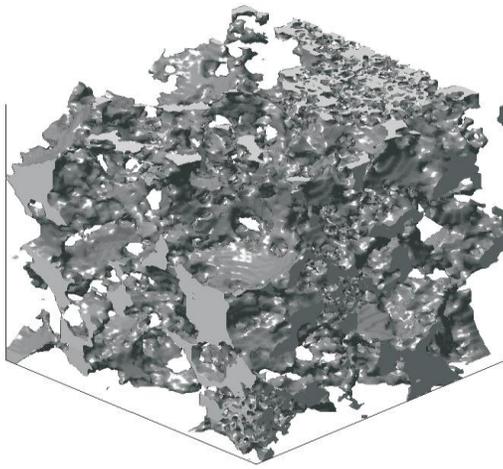


Fig. 1. Skeleton of sandstone showing its pores and solid grains. Dimensions are  $(3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3)$ . (Piri, 2003).

Figure 1 illustrates all the parts forming a poroelastic medium. Here  $V_B$  is the bulk volume, consisting of the rock skeleton formed by the union of the volume of the pores  $V_\Phi$  and the volume of the solid matrix  $V_S$  (Fig. 1). The control volume is  $\Delta V_B$ . The drained coefficients  $K_B$  and  $C_B$  are the bulk modulus and the bulk compressibility of the rock, respectively;  $1/H$  is a poroelastic expansion coefficient, which describes how much  $\Delta V_B$  changes when  $p_f$  changes while keeping the applied stress  $\sigma$  constant;  $1/H$  also measures the changes of  $\zeta$  when  $\sigma$  changes and  $p_f$  remains constant. Finally  $1/R$  is an unconstrained specific storage coefficient, which represents the changes of  $\zeta$  when  $p_f$  changes. Inverting the matrix equation (1) and replacing the value of  $\sigma$  in  $\zeta$  we obtain:

$$\sigma = K_B \varepsilon_B - \frac{K_B}{H} p_f \Rightarrow \zeta = \frac{K_B}{H} \varepsilon_B + \left( \frac{1}{R} - \frac{K_B}{H^2} \right) p_f \quad (3)$$

The sign conventions are stress  $\sigma > 0$  in tension and  $\sigma < 0$  in compression; the volumetric strain  $\varepsilon_B > 0$  in expansion and  $\varepsilon_B < 0$  in contraction; the fluid content  $\zeta > 0$  if fluid is added to the control volume  $\Delta V_B$  and  $\zeta < 0$  if fluid is extracted from  $\Delta V_B$ ; the pore pressure  $p_f > 0$  if it is larger than the atmospheric pressure. Biot (1941) and Biot & Willis (1957) introduced three additional parameters,  $b$ ,  $M$  and  $C$ , that are fundamental for the tensorial formulation herein presented.  $1/M$  is called the constrained specific storage, which is equal to the change of  $\zeta$  when  $p_f$  changes measured at constant strain. Both parameters  $M$  and  $C$  are expressed in terms of the three fundamental ones defined in equation (2):

$$\frac{1}{M} = \left( \frac{\Delta \zeta}{\Delta p_f} \right)_{\varepsilon_B} = \frac{1}{R} - \frac{K_B}{H^2} \Rightarrow M = \frac{RH^2}{H^2 - K_B R}; \quad C = \frac{K_B}{H} M \quad (4)$$

Let  $C_S = 1/K_S$  be the compressibility of the solid matrix. The Biot-Willis coefficient  $b$  is defined as the change of confining pressure  $p_k$  with respect to the fluid pressure change when the total volumetric strain remains constant:

$$b = \left( \frac{\partial p_k}{\partial p_f} \right)_{\varepsilon} = 1 - \frac{K_B}{K_S} = \frac{C}{M} = \frac{K_B}{H} \quad (5)$$

The coefficient  $C$  represents the coupling of deformations between the solid grains and the fluid. The coefficient  $M$  is the inverse of the constrained specific storage, measured at constant strain (Wang, 2000); this parameter characterizes the elastic properties of the fluid because it measures how the fluid pressure

changes when  $\zeta$  changes. These three parameters  $b$ ,  $M$  and  $C$  are at the core of the poroelastic partial differential equations we introduce herein (Bundschuh and Suárez-Arriaga, 2010).

### Model of Isothermal Poroelasticity

Let  $\mathbf{u}_s$  and  $\mathbf{u}_f$  be the displacements of the solid and fluid particles; let  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s$  be the displacement of the fluid phase relative to the solid matrix respectively. Let  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $\varphi_s$ ,  $\varphi$ ,  $V_s$  and  $V_f$  be the volumetric dilatations, porosities and volumes of each phase;  $-\varepsilon_v$  is the volumetric deformation of the fluid phase relative to the solid phase. The mathematical expressions of these variables are:

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = \varepsilon_s = \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_s; \quad \frac{\Delta V_f}{V_f} = \varepsilon_f = \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_f \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_s - \varepsilon_f; \quad \vec{u} = \vec{u}_f - \vec{u}_s \Rightarrow -\varepsilon_v = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{u}_s - \vec{u}_f) = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Biot and Willis (1957) introduced the strain variable  $\zeta(u, t)$ , defined in equation (3), to describe the volumetric deformation of the fluid relative to the deformation of the solid with homogeneous porosity:

$$\zeta(\vec{u}, t) = \varphi \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}_s - \vec{u}_f) = \varphi \varepsilon_s - \varphi \varepsilon_f = \varphi \varepsilon_v \quad (7)$$

The function  $\zeta$  represents the variation of fluid content in the pore during a poroelastic deformation. The total applied stresses in the porous rock are similar to the equations of classic elasticity. However, we need to couple the effect of the fluid in the pores. The linear components of the global stresses, deduced experimentally by Biot, (Biot, 1941; Biot and Willis, 1957; Wang, 2000) are:

$$\sigma_{ij} = \lambda_U \varepsilon_B \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} - C \zeta \delta_{ij} \quad (8)$$

Where:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ 0, & \text{if } i \neq j \end{cases}, \quad \lambda_U = \lambda + Cb; \quad \text{for } i, j = x, y, z$$

The fluid pressure is deduced from equation (3):

$$p_f = \frac{K_B R H^2}{H^2 - K_B R} \left[ \frac{\zeta}{K_B} - \frac{\varepsilon_B}{H} \right] \quad (9)$$

We define a two-order tensor  $\boldsymbol{\sigma}_T = (\sigma_{ij})$  in four dimensions, which includes the bulk stress tensor  $\boldsymbol{\sigma}_B$  acting in the porous rock and the fluid stress  $\boldsymbol{\sigma}_F$  acting in the fluid inside the pores, positive in compression:

$$\boldsymbol{\sigma}_T = \boldsymbol{\sigma}_B + \boldsymbol{\sigma}_F \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{ij} = (\lambda_U \varepsilon_B - C \zeta) \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \\ \sigma_f = p_f = M \zeta - C \varepsilon_B; \quad i, j = x, y, z \end{cases} \quad (10)$$

This tensorial equation becomes identical to the Hookean solids equation, when the rock has zero porosity and  $b = 0$ . From equations (8) and (9), we deduce that:

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - b p_f \delta_{ij} \quad (11)$$

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_B \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (12)$$

Tensor  $\tau_{ij}$  is called the Terzaghi (1943) effective stress that acts only in the solid matrix;  $bp_f$  is the pore-fluid pressure. Since there are no shear tensions in the fluid, the pore fluid pressure affects only the normal tensions  $\sigma_i$  ( $i = x, y, z$ ). The functions  $\sigma_{ij}$  are the applied stresses acting in the porous rock saturated with fluid. The solid matrix ( $\tau_{ij}$ ) supports one portion of the total applied tensions in the rock and the fluid in the pores ( $bp_f$ ) supports the other part. This is a maximum for soils, when  $b \approx 1$  and is minimum for rocks with very low porosity where  $b \approx 0$ . For this reason,  $b$  is called the effective stress coefficient. Inverting the matrices of equations (8) and (9), we arrive to the following tensorial form of the poroelastic strains:

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\sigma_{ii}}{2G} - \frac{3\nu}{E}\sigma_M + \frac{P_f}{3H}; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2G}, \quad \zeta = \frac{\sigma_M}{H} + \frac{P_f}{R} = \frac{C\sigma_M + K_U P_f}{M K_U - C^2} \quad (13)$$

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = K_B \varepsilon_B - bM \zeta, \quad K_B = \lambda + \frac{2}{3}G; \quad K_U = K_B + b^2M \quad (14)$$

The coefficient  $K_U$  is the undrained bulk modulus, which is related to the previous defined coefficients. Note that both tensorial equations (10) and (13) only need four basic poroelastic constants. The presence of fluid in the pores adds an extra tension due to the hydrostatic pressure, which is identified with the pore pressure, because it is supposed that all the pores are interconnected. This linear theory is appropriate for isothermal, homogeneous, and isotropic porous rocks.

### Thermo-poroelasticity Model

The equations of non-isothermal poroelastic processes are deduced using the Gibbs thermo-poroelastic potential or available enthalpy per unit volume and the energy dissipation function of the skeleton (Coussy, 1991). Analytic expressions are constructed in terms of the stresses, the porosity, the pore pressure, and the density of entropy per unit volume of porous rock. As we did for the isothermal poroelasticity, we can write in a single four-dimensional tensor the thermo-poroelastic equations relating stresses and strains. We have for the pore pressure:

$$p - p_0 = M(\zeta - \zeta_0) - C\varepsilon_B - M\varphi(\gamma_\varphi - \gamma_f)(T - T_0) \quad (15)$$

The volumetric thermal dilatation coefficient  $\gamma_B$  [1/K] measures the dilatation of the skeleton and  $\gamma_\varphi$  [1/K] measures the dilatation of the pores:

$$\gamma_B = \frac{1}{V_B} \left( \frac{\partial V_B}{\partial T} \right)_{p_k}, \quad \gamma_\varphi = \frac{1}{V_\varphi} \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial T} \right)_{p_f} = \frac{1}{\varphi} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right)_{p_f} \left[ \frac{1}{\text{K}} \right] \quad (16)$$

The fluid bulk modulus  $K_f$  and the thermal expansivity of the fluid  $\gamma_f$  [1/K] are defined as follows:

$$\frac{1}{K_f} = C_f = \frac{1}{\rho_f} \left( \frac{\partial \rho_f}{\partial p} \right)_T \quad (17)$$

$$\gamma_f = \frac{1}{V_f} \left( \frac{\partial V_f}{\partial T} \right)_{p_f} = \frac{-1}{\rho_f} \left( \frac{\partial \rho_f}{\partial T} \right)_{p_f} \quad (18)$$

The term  $p_k$  is the confining pressure. Expanding the corresponding functions of the Gibbs potential and equating to zero the energy dissipation we obtain the 4D thermoporoelastic equations, which include the thermal tensions in the total stress tensor (Bundschuh and Suárez-Arriaga, 2010):

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0 = (\lambda \varepsilon_B - b(p - p_0)) \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} - K_B \gamma_B (T - T_0) \quad (19)$$

In this case, an initial reference temperature  $T_0$  and an initial pore pressure  $p_0$  are necessary because both thermodynamic variables  $T$  and  $p$  are going to change in non-isothermal processes occurring in porous rock. The fluid stress is deduced in a similar way:

$$\sigma_f = p_f = M(\zeta - \zeta_0) - C \varepsilon_B - M \varphi (\gamma_\phi - \gamma_f) (T - T_0) \quad (20)$$

### Dynamic Poroelastic Equations

The formulation we introduced herein is very convenient to be solved using the Finite Element Method. The fundamental poroelastic differential equation is the tensorial form of Newton's second law in continuum porous rock dynamics:

$$\overline{\text{div}} \vec{\sigma}_T + \vec{F} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}; \quad \overline{\text{div}} \vec{\sigma}_T = L^T \cdot \vec{\sigma}_T, \quad \vec{\sigma}_T = C_B \cdot \vec{\varepsilon}_T; \quad \vec{\varepsilon}_T = L \cdot \vec{u} \quad (21)$$

The terms  $\vec{\sigma}_T$  and  $\varepsilon_T$  are the equivalent vectorial form of tensorial equations (20) and  $C_B$  is the matrix of poroelastic constants. While  $\mathbf{F}$  is the body force acting on the rock and the tensor differential operator  $L$  is given by:

$$L^T = \begin{pmatrix} \partial_x & 0 & 0 & \partial_y & \partial_z & 0 & \partial_x \\ 0 & \partial_y & 0 & \partial_x & 0 & \partial_z & \partial_y \\ 0 & 0 & \partial_z & 0 & \partial_x & \partial_y & \partial_z \end{pmatrix} \Rightarrow L \cdot \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = \vec{\varepsilon}_T = (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{yz} \ e_r) \quad (22)$$

Where  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  is the displacement vector of equation (6). Using the operator  $L$  in equation (22), the dynamic poroelastic equation becomes:

$$(L^T \cdot C_B \cdot L) \cdot \vec{u} + \vec{F} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (23)$$

### Solution of thermo-poroelastic equations: The Finite Element Method

Equation (24) includes Biot's poroelastic theory. It can be formulated and numerically solved using the Finite Element Method (FEM). Let  $\Omega$  be the bulk volume of the porous rock, and let  $\partial\Omega$  be its boundary,  $\mathbf{u}$  is the set of admissible displacements in Eq. (22);  $\mathbf{f}_b$  is the volumetric force and  $\mathbf{f}_s$  is the force acting on the surface  $\partial\Omega$ . After doing some algebra we arrive to a FEM fundamental equation for every element  $V^e$  in the discretization:

$$K^e \cdot \vec{d}^e + M^e \cdot \frac{\partial^2 \vec{d}^e}{\partial t^2} = \vec{F}^e; \quad e = 1, M \quad (24)$$

$\mathbf{d}^e$  is a vector containing the displacements of the nodes in each  $V^e$ . Equation (25) approximates the displacement  $\mathbf{u}$  of the poroelastic rock.  $\mathbf{F}^e$  is the vector of total nodal forces.  $K^e$  and  $M^e$  are the stiffness and equivalent mass matrices for the finite element  $V^e$ . The mathematical definitions of both matrices are:

$$K^e = \int_{V^e} B^T \cdot C_B \cdot B \, dV; \quad B = L \cdot N; \quad M^e = \int_{V^e} \rho N^T \cdot N \, dV; \quad e = 1, M \quad (25)$$

Where  $N$  is the matrix of shape functions that interpolate the displacements (Liu and Quek, 2003). Matrix  $B$  is called the strain poroelastic matrix.

### Solution of the Model for Particular Cases

This section contains two brief illustrations of the deformation of an aquifer (Leake & Hsieh, 1997) and the form that a temperature change can affect its poroelastic deformation. In the first example, we assume cold water at 20°C (1000 kg/m<sup>3</sup>). After, we consider a higher temperature of 250°C (50 bar, 800.4 kg/m<sup>3</sup>). The model was programmed and the computations done using COMSOL-Multiphysics© (2006). Results are shown in figures (4) to (9). Three sedimentary layers overlay impermeable bedrock in a basin where faulting creates a bedrock step (BS) near the mountain front (Fig. 2). The sediment stack totals 420 m at the deepest point of the basin ( $x = 0$  m) but thins to 120 m above the step ( $x > 4000$  m). The top two layers of the sequence are each 20 m thick. The first and third layers are aquifers; the middle layer is relatively impermeable to flow. Water obeys Darcy’s law for head  $h$  ( $K_x, K_y$  are the hydraulic conductivities and  $S_s$  is the specific storage):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \tag{26}$$

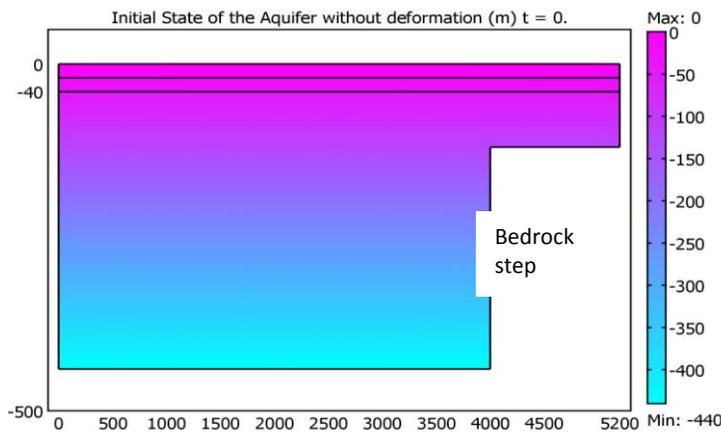


Fig. 2. Simplified geometry of the aquifer and the impermeable bedrock in the basin. Initial state.

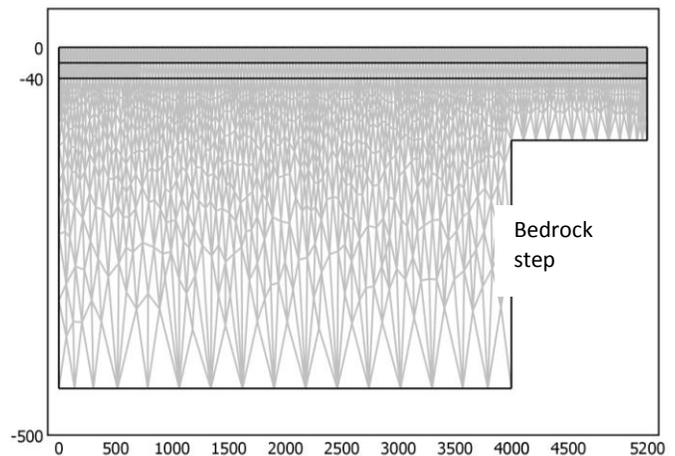


Fig. 3. Mesh of the basin showing 2967 elements.

As given by the problem statement, the materials here are homogeneous and isotropic within a layer. The flow field is initially at steady state, but pumping from the lower aquifer reduces hydraulic head by 6 m per year at the basin center (under isothermal conditions). The head drop moves fluid away from the step. The fluid supply in the upper reservoir is limitless. The period of interest is 10 years. The corresponding FE mesh has 2967 elements excluding the bedrock step (Figure 3). The rock is Hookean, poroelastic and homogeneous. For the computations, data of Table 1 were used. In the first example for the Biot-Willis coefficient we assume that  $b = 0.3$ ; in the second example  $b = 1.0$ .

Hydraulic conductivity, upper and lower aquifers	$K_x = 25$ m/day	Poroelastic storage coefficient, upper aquifer	$S_s = 1.0 \times 10^{-6}$
Hydraulic conductivity confining layer	$K_y = 0.01$ m/day	Poroelastic storage coefficient, lower aquifer	$S_s = 1.0 \times 10^{-5}$
Biot-Willis coefficient (cold water at 20°C)	$b = 0.3$	Biot-Willis coefficient (hot water at 250°C)	$b = 1.0$
Young’s modulus	$E = 8.0 \times 10^8$ Pa	Poisson’s ratio	$\nu = 0.25$

Table 1. Numerical values of the parameters used in the simulations.

### Discussion of Results

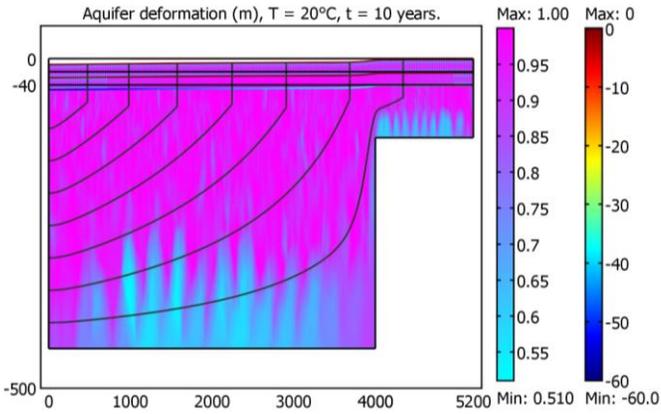


Fig. 4. Poroelastic deformation of the basin for the BS problem with cold water (20°C). Streamlines represent the fluid to porous rock coupling.

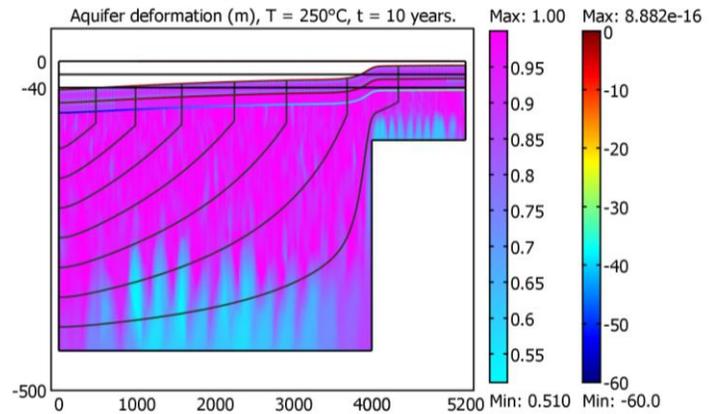


Fig. 5. Poroelastic deformation of the basin for the BS problem with hot water (250°C). Streamlines represent the fluid to porous rock coupling.

The two examples presented herein were solved using the Finite Element Method for a well-known problem of linked fluid flow and solid deformation near a bedrock step in a sedimentary basin described in a previous publication (Leake & Hsieh, 1997). The problem concerns the impact of pumping for a basin filled with sediments draping an impervious fault block. In the first example, we considered the water in the aquifer to be cold, at 20°C. In the second example, the water is geothermal fluid, at 250°C. The basin is composed of three layers having a total depth of 500 m and is 5000 m long in both cases. The Darcy’s law (eq. 26) for water is coupled to the rock deformation via equations (11) and (15) through the porosity  $\phi$ , which is implicit in the storage coefficient  $S_S$ :

$$S_S = \rho_f g (C_B + \phi C_f) \tag{27}$$

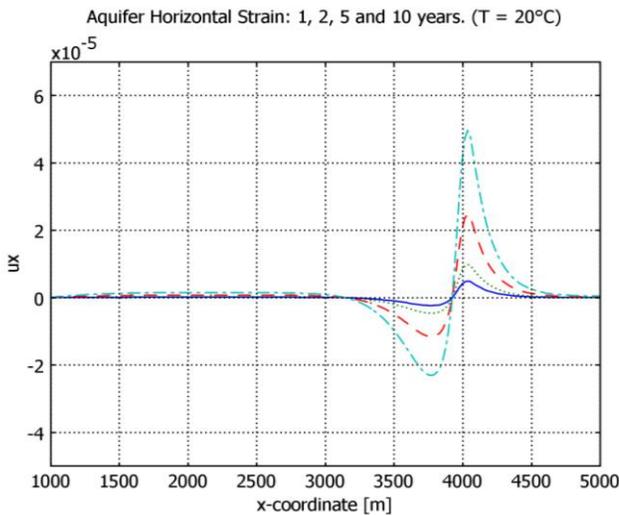


Fig. 6. Horizontal strain at the basin with a BS. Case of cold water (20°C).

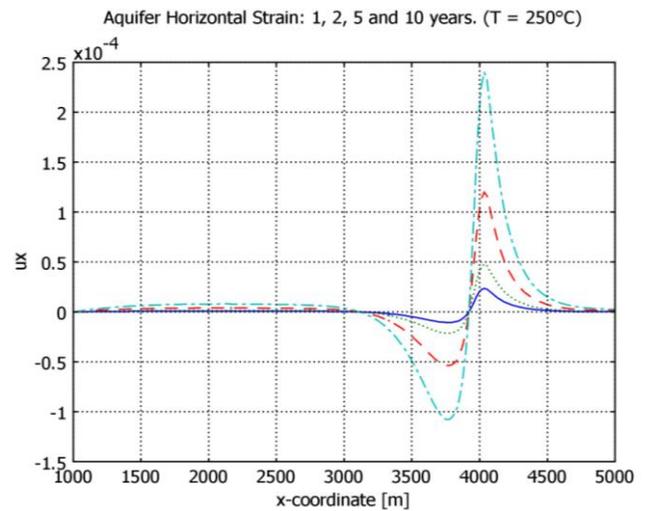


Fig. 7. Horizontal strain at the basin with a BS. Case of geothermal water (250°C).

Where  $g$  (9.81 m/s<sup>2</sup>) is gravity acceleration,  $\rho_f$  (1000 kg/m<sup>3</sup>) is the water density,  $C_B$  (0.22 x 10<sup>-9</sup> 1/Pa) is the bulk rock compressibility and  $C_f$  (0.4 x 10<sup>-9</sup> 1/Pa) is the compressibility of water. All units are in the SI. Figures (4) and (5) show simulation results of the basin for years 1, 2, 5, and 10, respectively. The second

simulation (Fig. 5) corresponds to a coupled thermoporoelastic deformation when the water in the aquifer is under geothermal conditions (fluid density of  $800.4 \text{ kg/m}^3$ , temperature of  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , and pressure of  $50 \text{ bar}$ ). Figures (6) and (7) compare the horizontal strains and figures (8) and (9) compare the vertical strains, in both cases respectively. Figures (6) and (7) also illustrate the evolution of lateral deformations that compensate for the changing surface elevation above the bedrock step. Note that vertical scales are different in both examples for clarity, except in figures (4) and (5).

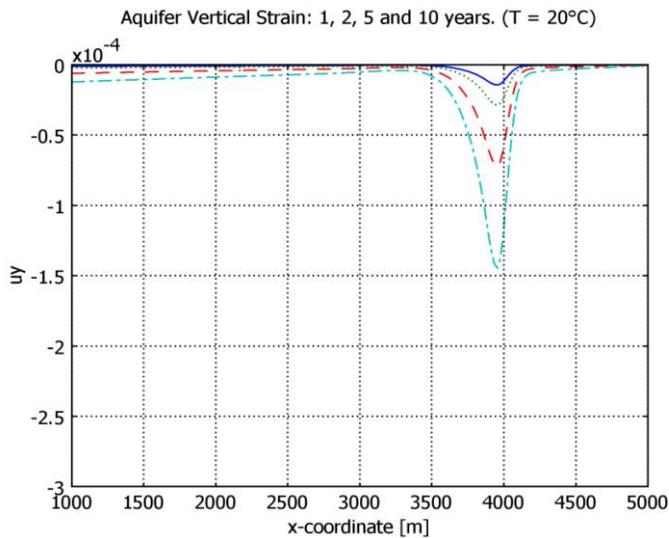


Fig. 8. Vertical strain at the basin with a BS. Case of cold water ( $20^\circ\text{C}$ ).

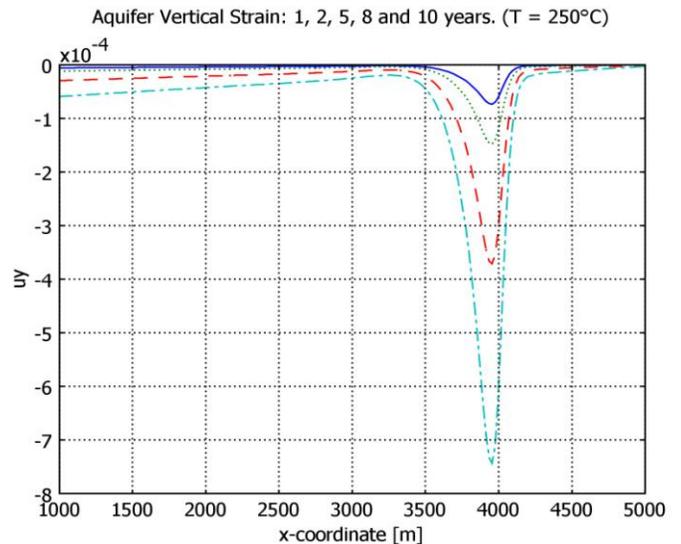


Fig. 9. Vertical strain at the basin with a BS. Case of geothermal water ( $250^\circ\text{C}$ ).

## Conclusions

- All crustal rocks forming geothermal reservoirs are poroelastic and the fluid presence inside the pores affects their geomechanical properties. The elasticity of aquifers and geothermal reservoirs is evidenced by the compression resulting from the decline of the fluid pressure, which can shorten the pore volume. This reduction of the pore volume can be the principal source of fluid released from storage.
- Immediate physical experience shows that the supply or extraction of heat produces deformations in the rocks. Any variation of temperature induces a thermo-poroelastic behavior that influences the elastic response of porous rocks.
- We introduced herein a general tensorial thermo-poroelastic model that takes into account both the fluid and the temperature effects in linear porous rock deformations, and presenting two practical examples solved with finite elements.
- The second example illustrates the influence of temperature changes on the poroelastic strains. For cold water, the estimated value of  $\varepsilon_z$  is about  $-1.5 \times 10^{-4}$ , while for hot water  $\varepsilon_z$  is  $-7.5 \times 10^{-4}$ . Therefore, the poroelastic deformations are much higher in geothermal reservoirs than in isothermal aquifers. In the first case the bulk modulus of water  $K_w = 0.45 \text{ GPa}$ , corresponding to  $T = 250^\circ\text{C}$ . For cold aquifers  $K_w = 2.5 \text{ GPa}$  approximately.
- Water bulk modulus affects other poroelastic coefficients, including the expansivity of rocks, which is relatively small, but its effects can produce severe structural damages in porous rocks subjected to strong temperature gradients, as happens during the injection of cold fluids.

**References**

- Biot, M.A., 1941. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, **12**, pp. 155-164.
- Biot, M.A. and D.G. Willis, 1957. The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation. *Journal of Applied Mechanics*, **24**, pp. 594-601.
- Bundschuh, J., and M.C. Suárez-Arriaga, 2010. *Introduction to the Modeling of Groundwater and Geothermal Systems: Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks*. CRC Press, Leiden, The Netherlands, 594 p.
- Coussy, O., 1991. *Mechanics of Porous Continua*. John Wiley & Sons, New York. 455 p.
- Leake, S.A., and P.A. Hsieh, 1997. Simulation of Deformation of Sediments from Decline of Ground-Water Levels in an Aquifer Underlain by a Bedrock Step. *US Geological Survey Open File Report 97-47*.
- Liu, G.R., and S. Quek, 2003. *The Finite Element Method – A Practical course*. Butterworth–Heinemann, Bristol. 348 p.
- Piri, M., 2003. Pore-Scale Modelling of Three-Phase Flow. PhD Thesis, Centre for Petroleum Studies, Department of Earth Science and Engineering, Imperial College, London. Unpublished.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York. 510 p.
- Wang, H.F., 2000. *Theory of Linear Poroelasticity - with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*. Princeton University Press, New Jersey. 287 p.

## Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

*Héctor Pérez Esquivias<sup>1</sup>, José Luis Macías Vázquez<sup>2</sup>, Víctor Hugo Garduño Monroy<sup>3</sup>, José Luis Arce Saldaña<sup>4</sup>, Felipe García Tenorio<sup>2</sup>, Renato Castro Govea<sup>2</sup>, Paul Layer<sup>5</sup>, Ricardo Saucedo Girón<sup>2</sup>, Carlos Martínez<sup>2</sup>, Adrián Jiménez Haro<sup>2</sup>, Gabriel Valdés<sup>2</sup>, Lorenzo Meriggi<sup>2</sup> y Ramón Hernández<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>CFE, Residencia de Los Azufres, correo: [hector.perez03@cfe.gob.mx](mailto:hector.perez03@cfe.gob.mx), <sup>2</sup>Instituto de Geofísica, UNAM, <sup>3</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, <sup>4</sup>Instituto de Geología, UNAM, <sup>5</sup>Universidad de Fairbanks, Alaska.

### Resumen

El propósito de este estudio fue actualizar y detallar el conocimiento geológico de superficie y del subsuelo de Los Azufres para realizar propuestas de localización de nuevos pozos geotérmicos y solucionar diversos problemas que puedan presentarse en el campo. El estudio cubrió una superficie de 984 km<sup>2</sup>. Se identificaron tres tendencias principales de fracturamiento: NNO-SSE, NE-SO y E-O. El primer tipo de fracturamiento corresponde a una deformación del Mioceno con geometría semi-vertical que afectó al basamento, mientras los otros dos se formaron con el Cinturón Volcánico Mexicano, tienen geometría semi-vertical y sub-horizontal, y afectaron regionalmente a rocas miocénicas del basamento y a rocas cuaternarias que afloran en el campo geotérmico. Las fallas más importantes para la localización de nuevos pozos resultaron ser Marítaro y Agua Fría, de dirección E-O. Mediante estudios vulcanológicos, diversos estudios de laboratorio y correlaciones del subsuelo y superficie se reconstruyó la secuencia lito-estratigráfica de la zona identificando al menos 64 tipos de aparatos volcánicos y los límites de sus respectivos depósitos, así como seis secuencias volcánicas principales de la región. Los estudios vulcanológicos no aportan argumentos para sostener la existencia de una caldera volcánica de gran dimensión como se había manejado años atrás, sino más bien definen a Los Azufres como un campo volcánico complejo. El producto final fue un mapa vulcanológico estructural digital geo-referenciado, elaborado en ArcGis 9.2, que ofrece muchas ventajas respecto a los antiguos mapas, y un modelo conceptual actualizado y bases de datos con información confiable.

*Palabras clave:* Los Azufres, geología estructural, vulcanología, modelo conceptual, estratigrafía volcánica.

## Structural and volcanologic study on the stratigraphic sequence at Mil Cumbres and the Los Azufres geothermal field, Mich.

### Abstract

The purpose of this study is first to increase knowledge of the surface and underground geology of Los Azufres geothermal field and then to propose locations for new geothermal wells, thus solving several field problems. The study area covers 984 km<sup>2</sup>. Three main fractures trends NNW-SSE, NE-SW, and E-W were identified. The first trend corresponds to a Miocene deformation with semi-vertical geometry affecting the basement. The two other trends were formed as part of the Mexican Volcanic Belt and present semi-vertical and sub-horizontal geometry in regionally affected Miocene basement rocks and Quaternary rocks outcropping in the geothermal field. The main faults used to locate new wells are the Marítaro and Agua Fría, trending E-W. By means of volcanic and laboratory studies, and surface and underground correlations, the litho-stratigraphic sequence of the zone was reconstructed and at least 64 types of volcanic structures were identified, including the limits of the deposits. The volcanic study does not show any large volcanic caldera, as once suggested, but shows Los Azufres to be a complex volcanic field. The final study product is a

digitized volcanic-structural and geo-referenced map, prepared with ArcGis 9.2. It includes an updated conceptual model and databases with reliable information.

*Keywords:* Los Azufres, structural geology, volcanology, conceptual model, volcanic stratigraphy.

---

## 1. Antecedentes

Los primeros estudios de la región de Los Azufres fueron dedicados al mapeo regional y descripciones petrográficas de las rocas (Demant *et al.*, 1975). A fines de los setenta la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó los primeros estudios geológicos de la zona geotérmica (Camacho, 1979; Camacho y Palacios, 1979; Garfias y González, 1978) seguidos de un estudio geocronológico (Aumento y Gutiérrez Negrín, 1980). Los trabajos de Demant (1976) y Silva-Mora (1979), marcaron un claro parteaguas en el conocimiento de la vulcanología de la zona, pues dividen el vulcanismo del estado de Michoacán en dos grandes provincias: al poniente reconocen el vulcanismo monogenético de la Meseta Purépecha, y al oriente un vulcanismo ligado a complejos de domos riolíticos y dacíticos, incluyendo a Los Azufres.

Durante las actividades de exploración del campo geotérmico de Los Azufres, De la Cruz *et al.* (1982), realizaron un estudio estructural en el que identifican tres tipos de fallas: estructuras NNE-SSO y NNO-SSE, afectando a rocas del Mioceno, un sistema muy penetrativo de dirección E-O que juega un papel importante en el campo geotérmico, y fallas N-S como las más jóvenes.

El primer estudio de la estratigrafía volcánica de la región lo realizaron en 1985 Dobson y Mahood, quienes denominaron el área como Centro Volcánico Los Azufres (CVLA), y proponen que este centro de composición silícica empezó su actividad hace aproximadamente 1 Ma, resumida en tres secuencias eruptivas que denominaron riocitas Agua Fría (1.03-0.84 Ma), dacitas San Andrés (0.33 Ma) y riolitas La Yerbabuena (0.30-0.15 Ma). También describieron depósitos ignimbríticos cuya composición química era más evolucionada que las rocas de Los Azufres por lo que los asociaron con la formación del centro volcánico y por ende descartaron la presencia de una caldera. Describieron que Los Azufres era afectado por dos sistemas de fallas, el más antiguo con dirección N-S, cortado por un sistema más joven con orientación E-O y que formaba un graben en el Lago de Cuitzeo. Finalmente proponen que Los Azufres se encuentra emplazado sobre una secuencia espesa de 2700 m de andesitas, cortada en el Pozo Az-20 y fechada en 10.2 Ma (Garfias y Casarrubias, 1979).

Ese mismo año, Pradal y Robin (1985) propusieron alternativamente que Los Azufres era en realidad una caldera resurgente de edad Pleistoceno Medio con un diámetro de 18 x 20 km. Posteriormente, Garduño-Monroy (1987) identificó estructuras NO-SE y NNO-SSE ligadas con la tectónica de Cuencas y Sierras, con componentes laterales más importantes, estructuras NE-SO ligadas con el surgimiento del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), el vulcanismo monogenético de Michoacán y la apertura de las cuencas lacustres y estructuras normales E-O pertenecientes al sistema de fallas Morelia-Acambay. También correlacionó las rocas del basamento de la zona con la ayuda de mediciones en las zonas aledañas al campo geotérmico de Los Azufres. Los resultados de este trabajo indican que la región ha sufrido dos eventos de deformación que incluyen compresión con pliegues NE-SW y NW-SE durante el Cretácico superior, seguido de otra fase de compresión durante el Mioceno, para posteriormente ser afectada por un evento de tensión correspondiente al sistema de Sierras y Cuencas.

Para 1991 Pasquaré y colaboradores concluyeron que los sistemas estructurales NE-SO y E-O han tenido una gran importancia en la fragmentación de la placa de Norteamérica. Ese año López-Hernández (1991) realizó un análisis estructural basado en información obtenida en campo, definió a las fallas Agua Fría y Marítaro como estructuras principales en el campo geotérmico, así como una clara dirección de fracturamiento E-O presente en todo el campo geotérmico. Dividió al campo en tres sectores de acuerdo a las características de



✓ **Estudios de laboratorio:** clasificación petrográfica y química de las diferentes unidades encontradas, su caracterización y la definición de sus parámetros mineralógicos y químicos de correlación. Entre los objetivos estaba definir la cronología de los diferentes eventos volcánicos y tectónicos de superficie y subsuelo, con base en fechamientos por los métodos  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  y  $^{14}\text{C}$ , así como realizar análisis granulométricos para determinar los componentes, tamaño predominante y mecanismos de depósito de flujos piroclásticos, para establecer su origen y correlación con los de otros lugares.

El Campo Volcánico Los Azufres (CVLA) es un alto topográfico a 3000 m sobre el nivel del mar (msnm), ubicado en la parte noreste del Estado de Michoacán, cerca de los límites con el Estado de Guanajuato y a 90 km de la ciudad de Morelia. Se encuentra en la parte central del CVM (Fig. 1, parte superior). Uno de los rasgos más peculiares de todo el CVM, y más acentuado en su parte central, es la presencia de fallas recientes y activas con dirección E-O, aunque en Los Azufres también ocurren fallas en direcciones NE-SO y NO-SE. La zona de estudio comprende un cuadrante de  $34 \times 28$  km, con un área total de  $984.4 \text{ km}^2$  (Fig. 1, parte inferior).

### 3. Geología estructural

El estudio consistió de cuatro etapas: levantamiento cartográfico, levantamiento estructural de fallas y fracturas, análisis y manejo de los datos e interpretación de los resultados con la ayuda de software especializado. Los levantamientos de campo fueron seleccionados de acuerdo a una discusión previa del grupo de trabajo. La elección de los sitios se basó en la importancia del fracturamiento, estructura principal, papel del fracturamiento en el yacimiento geotérmico y edad relativa de las rocas. Se encontraron diferencias importantes en lo referente a estructuras volcánicas y unidades litológicas con respecto a estudios previos, ya que cada uno de los polígonos se levantó en campo verificándose cada uno de sus contactos. Todo el levantamiento se realizó con la filosofía de que el fracturamiento tiene un comportamiento fractal y que por lo tanto aquél que se levante a una escala métrica (meso-estructura) tiene una clara representación en todo el yacimiento geotérmico de Los Azufres.

Los objetivos principales del estudio estructural fueron: analizar el fracturamiento de las rocas a diferentes escalas y las fallas de aquellas donde se encuentra alojado el yacimiento geotérmico y las de la zona de Los Azufres. Las primeras están expuestas en las Sierras de Santa Inés y Mil Cumbres. Los resultados de las mediciones estructurales en estos sitios muestran un intenso fracturamiento y fallamiento con tres tendencias principales: NNO-SSE, NE-SO y E-O.

Las estructuras de dirección NNO-SSE están relacionadas con la deformación ocurrida entre el Oligoceno (33.7-23.8 Ma) y Mioceno (23.8-5 Ma) y a través de sus rasgos estructurales fueron identificadas como fallas laterales provocadas por deformación del basamento. Cabe señalar que estas sólo se observan a nivel regional, como ocurre con la falla Tzitzio-Valle de Santiago. Además, con el campo de esfuerzo actual estas estructuras se desplazan en forma de fallas laterales derechas normales, que desplazan y controlan a la cuenca lacustre de Cuitzeo.

Las estructuras con orientación NE-SO y E-O fueron originadas durante la formación del CVM. En particular, las estructuras con dirección NE-SO son poco visibles en el campo de Los Azufres, y se caracterizan por presentar planos de falla casi verticales, aunque existen algunos con inclinaciones cercanas a los  $45^\circ$ . Las fallas con tendencia E-O son las más abundantes y de mayor importancia, ya que afectan a todas las unidades litológicas y secuencias lacustres de edad holocénica ( $<0.01$  Ma) e histórica en el campo de Los Azufres, y porque sobre ellas se encuentra la mayor parte de la alteración hidrotermal del campo. Ejemplos claros de estas estructuras son las fallas de Marítaro y de Agua Fría, ambas con evidencias morfológicas o paleo-sismológicas de actividad sísmica actual.

El fracturamiento de rocas andesíticas, riolíticas e ignimbríticas miocénicas tiene una geometría semi-vertical, y es de suma importancia para el campo porque a través de esta característica geométrica se propone más adelante un modelo estructural conceptual del yacimiento geotérmico, en el que el fracturamiento y fallamiento estarían representados de la siguiente manera:

a) En las riolitas Agua Fría, el fracturamiento tiene planos sub-horizontales que no son representativos del yacimiento sino mas bien responden a procesos de relajamiento de la carga litostática debidos a su intrusión y a la actividad minera.

b) El fracturamiento en rocas andesíticas almacenadoras del yacimiento geotérmico es intenso, de acuerdo con las densidades obtenidas, y de tipo semi-vertical; los escasos planos sub-horizontales obedecen a diaclasamiento por enfriamiento de las lavas. Por otro lado, la intersección de planos de fracturas se debe considerar como un elemento planar importante en la movilidad de los fluidos geotérmicos y sobre todo en lo referente a recarga del yacimiento.

c) Las fallas Agua Fría y Marítaro generaron un fracturamiento importante y pueden ser objetivos en la localización de nuevos pozos. No es el caso de las otras estructuras, que son menores, en donde más bien se debe buscar el fracturamiento general del yacimiento como objetivo de los pozos. Muchas de las fallas, por su cartografía, son menores y poco profundas.

d) El fallamiento originado por la deformación actual es semi-vertical ( $80-90^\circ$ ) en las lavas riolíticas principalmente, mientras que en las andesitas y basaltos es de unos  $70^\circ$  a  $80^\circ$ , y se vuelve menos inclinado a medida que se profundiza.

Como resultado del estudio se elaboró un mapa estructural regional de la zona en Arc Gis 9.2, que cuenta con una base de datos para cargar la foto del afloramiento, coordenadas, rosa de fracturamiento, estereograma, diagrama de polos y una hoja con las mediciones efectuadas de cada estación realizada en este estudio (Fig. 2).

#### 4. Resultados del estudio vulcanológico

Mediante la interpretación fotogeológica, el levantamiento de 168 secciones estratigráficas, el mapeo vulcanológico del área, la correlación estratigráfica de unidades cartografiables y diferentes tipos de análisis de laboratorio, se definió la evolución vulcanológica del área de estudio, identificando seis secuencias volcánicas principales, cada una compuesta por dos o más unidades volcánicas. Estas unidades volcánicas son, de mayor a menor edad estratigráfica: Sierra de Mil Cumbres, Ignimbrita Pucuateo, Sierra de Santa Inés e Ignimbrita Santa Inés, Sierra de El Fraile, Campo Volcánico Los Azufres y Basaltos-Andesitas del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG), perteneciente a la parte oeste del CVM (Fig. 3). De

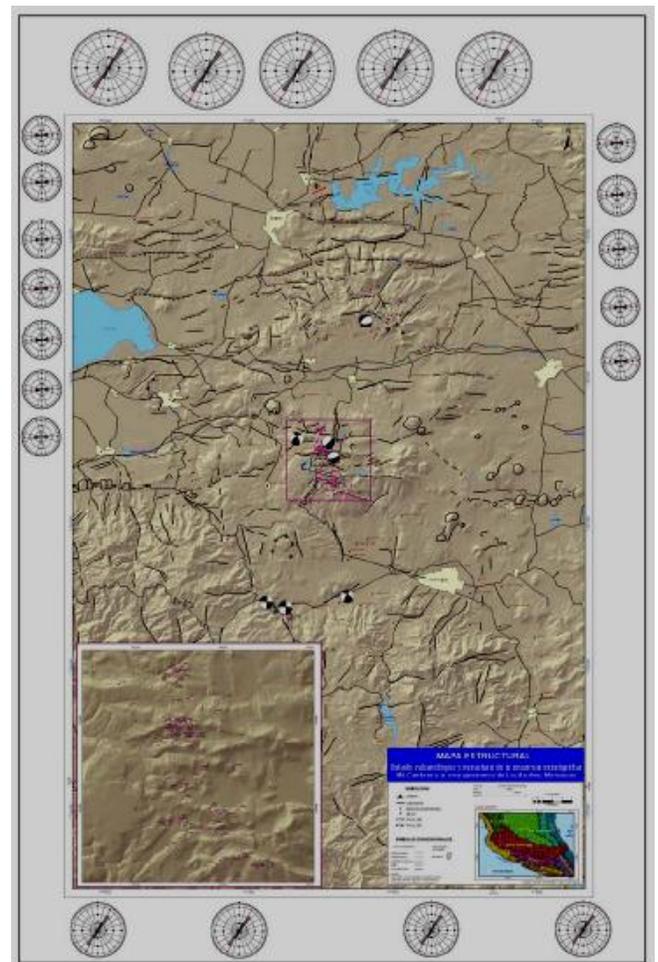


Fig. 2. Mapa estructural regional del CVLA.

estas seis secuencias volcánicas, sólo cuatro convergen en el área de estudio y cada una tiene una historia geológica diferente.

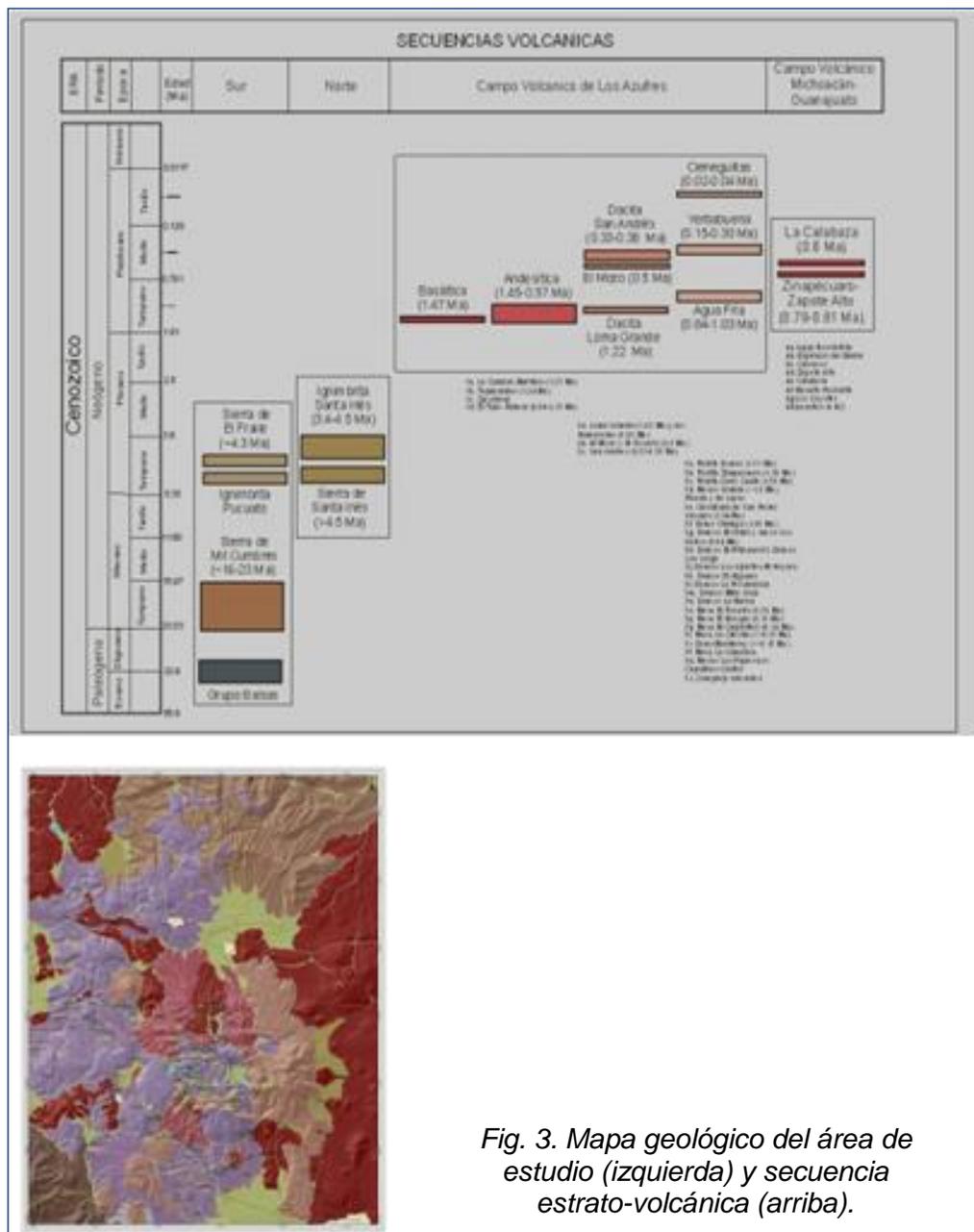


Fig. 3. Mapa geológico del área de estudio (izquierda) y secuencia estrato-volcánica (arriba).

La actividad volcánica empezó a partir el Mioceno temprano hace por lo menos unos 23 Ma, con el emplazamiento de una secuencia compleja de espesas ignimbritas soldadas, brechas, piroclastos de caída y oleadas piroclásticas y derrames de lava (Secuencia de Mil Cumbres), en la porción centro y sur del área de estudio. Las nuevas edades de roca obtenidas en este trabajo sugieren que esta actividad volcánica continuó hasta fines del Mioceno Temprano (17 Ma). Por el momento se desconoce si este vulcanismo estuvo ligado a centros eruptivos o actividad fisural así como la proveniencia de los materiales. Al parecer se trata de una zona volcánica probablemente asociada al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental o a inicios del vulcanismo del CVM (Ferrari *et al.*, 1999). Estructuralmente, las rocas de la Sierra de Mil

Cumbres fueron cortadas por la Falla Huajúbaro-Zinapécuaro de dirección NO-SE (según estudio estructural) y desplazadas a mayor profundidad, por lo que aparecen entre 700 y 1000 m de profundidad en los pozos de Los Azufres.

Después de un periodo de unos 2.5 Ma de posible calma volcánica (que bien podría tratarse de escasa resolución en la estratigrafía disponible en este momento), la actividad continuó hace ~14.5 Ma con la formación de un estratovolcán en la parte norte del área de estudio que originó la Secuencia de Santa Inés. En la actualidad esta secuencia en la Sierra de Santa Inés tiene una forma arqueada abierta hacia el sur que parece indicar que el volcán fue destruido por una erupción de gran magnitud asociada a la formación de una caldera. Ferrari *et al.* (1991) propusieron que esta caldera se había formado hace 4.5 Ma con el emplazamiento de la Ignimbrita de Santa Inés. Sin embargo, la nueva edad obtenida para la secuencia Santa

Inés, de 14.5 Ma, y para la ignimbrita del mismo nombre, de sólo 4.7 Ma, indican claramente que no tienen una genética común. El único depósito que podría estar asociado a la formación de esta caldera es la Ignimbrita de Pucuate (de 14.47 Ma) (Fig. 3), que está expuesta al sur del área de estudio, pero en este trabajo no se cuenta con mayor información para realizar una correlación más precisa.

Después de la formación de la estructura arqueada en la Sierra de Santa Inés, hubo un hiatus de la actividad volcánica que duró varios millones de años. La actividad continuó hace ~7 Ma mediante la efusión de lavas andesíticas expuestas sobre la Secuencia de Mil Cumbres al SO del área de estudio. Se desconoce si esta efusión lávica está asociada a la reactivación de la actividad volcánica de Mil Cumbres o si se debe a alguna actividad puntual en el área. Posteriormente, se nota un retorno de la actividad volcánica en la región, mediante el emplazamiento explosivo de la Ignimbrita de Santa Inés hace ~4.7 Ma, la cual rellena depresiones en la Sierra de Santa Inés, al norte del área de estudio. Más adelante, hace ~4.3 Ma ocurrió el emplazamiento de dacitas y flujos piroclásticos que formaron los domos de la Sierra El Fraile al SE del área de estudio.

La formación del Campo Volcánico Los Azufres comenzó hace aproximadamente 1.47 Ma. El magmatismo no estuvo centrado en un lugar único que hubiera dado lugar a la formación de un estratovolcán, sino más bien estuvo supeditado al ascenso de magma a través de fallas corticales que atraviesan el área, dando lugar a la emisión fisural de lavas de manera aleatoria. De esta forma el magmatismo empezó con emisiones basálticas como las del norte de San Pedro Jacuaro y Rincón de Rubios, que son la base del cerro Chinapo. Continúo con la emisión de lavas andesíticas, como las de La Cumbre, Marítaro, y Tejamaniles, que formaron aparatos como El Zacatonal, El Tule y El Palmar; el rango de edades de estos aparatos y lavas va de 1.47 a 0.97 Ma. Continuaron lavas dacíticas que formaron domos como Loma Grande, Las Humaredas, El Mozo y San Andrés, con edades de 1.22 hasta 0.33 Ma. Finalmente ocurrió una evolución a emisiones riolíticas que originaron domos como los de Agua Fría, Chinapo y Cieneguillas, y mesas como La Yerbabuena, entre muchos otros, con edades que van de 1.03 a 0.02 Ma (Fig. 3). Los productos asociados a este vulcanismo riolítico (domos y mesas) descansan invariablemente sobre lavas de composición andesítica o andesítico-basáltica, pertenecientes a aparatos que corresponden al vulcanismo monogenético del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato el cual es la parte oeste del CVM. Estos volcanes ocurren en la periferia del área de estudio; en su gran mayoría son conos cineríticos compuestos por derrames de lava alternados con depósitos de caída de escoria y bombas volcánicas, como los volcanes Agua Escondida, El Nopalito, Espinazo del Diablo y Carrasco, entre otros, con edades que varían de 0.81 a 0.6 Ma y que se formaron previamente a los domos y mesas. De acuerdo a las observaciones de campo, y con base en las edades radiométricas disponibles, las mesas más jóvenes son las de El Bosque y El Carpintero, cuyos productos piroclásticos (flujos) rellenan depresiones.

Finalmente, debe mencionarse que la actividad del CVLA no ha terminado, ya que han ocurrido erupciones riolíticas durante el Pleistoceno Tardío, como las del Complejo Volcánico Guangoche, los domos del área de Acámbaro y en el Volcán San Andrés. Además, junto con la actividad volcánica hay fallas regionales activas que cortan al complejo. Muchos de los domos tienen un control estructural muy marcado por fallas E-O, como la de Agua Fría que ha originado el colapso hacia el sur (dirección de máxima extensión del campo de esfuerzos regional) del Domo El Chinapo, el Volcán San Andrés y el Cerro Guangoche. Adicionalmente, tanto lavas de composición dacítica como domos y aparatos volcánicos monogenéticos han sido emitidos a partir de fallas regionales E-O (y en otras direcciones como NO-SE) (Fig. 3).

El resultado de esta parte del estudio fue el mapa vulcanológico y geológico elaborado en ArcGis 9.2, que presenta mucho más detalle que todos los mapas anteriores a pesar de ser muy regional. Mediante links se pueden consultar los datos de cada afloramiento incluido en este estudio, tales como coordenadas, descripción y columna estratigráfica.

## 5. Resultados de los estudios de laboratorio

Se realizaron cuatro diferentes tipos de estudios de laboratorio:

- ✓ Estudios petrográficos.
- ✓ Análisis químicos de roca total.
- ✓ Fechamientos radiométricos por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y  $^{14}\text{C}$ .
- ✓ Estudios granulométricos.

Los resultados de los estudios de laboratorio fueron muy útiles para alcanzar los objetivos.

Petrográficamente se documentó una variación litológica diferenciada desde basalto hasta riolita en las muestras de los pozos. Las rocas predominantes son andesitas de clinopiroxeno, seguidas de andesitas basálticas y en menor abundancia se encuentran basaltos, dacitas y riolitas. Pudieron identificarse muchas interrupciones en el vulcanismo, de tal manera que aunque las andesitas son las rocas ígneas más abundantes, no llegan a formar unidades individuales de varios centenares de metros de espesor. Más bien son muchas unidades de composiciones semejantes, producto del tipo (monogenético) y composición del vulcanismo en el área, que fueron producidas por una gran cantidad de erupciones y aparatos volcánicos diferentes. Se identificaron también depósitos de tipo lacustre y palustre, flujos piroclásticos, depósitos de caída y avalanchas.

Desde el punto de vista geoquímico, el espectro analizado varió de andesita basáltica a riolita, con tres rocas de carácter alcalino. Estos datos se ubicaron en los diagramas de clasificación química  $\text{SiO}_2$  contra  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ , tanto para las rocas que afloran en superficie (Fig. 4) como para las rocas subterráneas colectadas de los pozos (Fig. 5). Estas últimas incluyeron basaltos traquiandesíticos.

Los fechamientos por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y  $^{14}\text{C}$  arrojaron dos grupos de edades principalmente: uno del Mioceno (17-23 Ma), correspondiente a la Sierra Mil Cumbres y a rocas profundas del campo de Los Azufres, y otro del Cuaternario (<1.47 Ma) para todo el vulcanismo del CVLA (Tabla 1). Sólo se obtuvieron dos edades superficiales del Plioceno en la Sierra del Fraile (4.3 Ma) y en la Ignimbrita de Santa Inés (4.5 a 3.4 Ma).

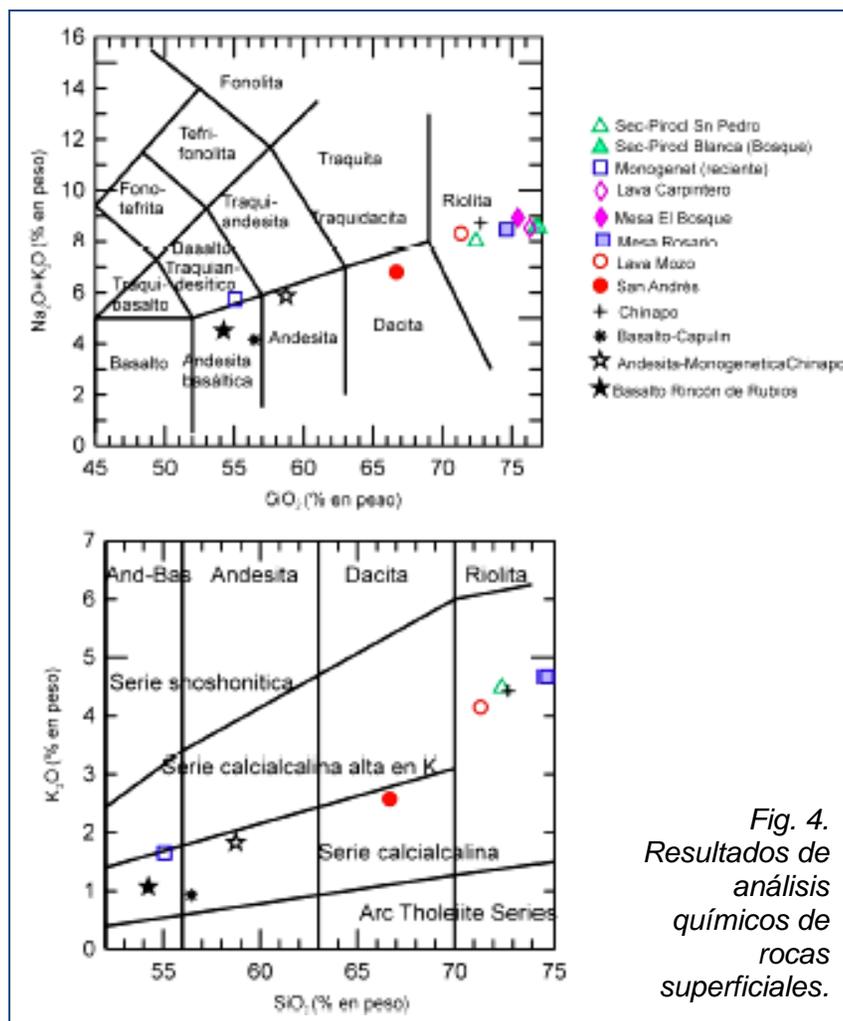


Fig. 4.  
Resultados de  
análisis  
químicos de  
rocas  
superficiales.

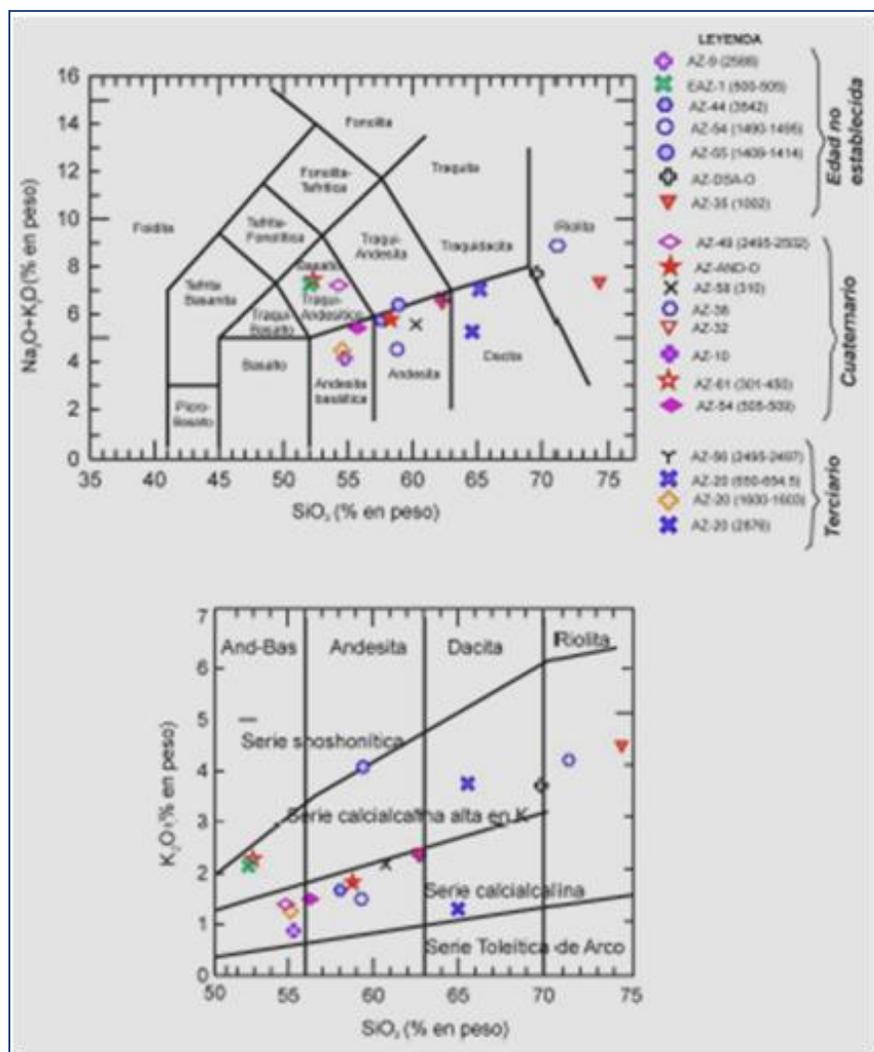


Fig. 5. Resultados de análisis químicos en rocas subterráneas de los pozos de Los Azufres.

subsuelo consistente en una gran cantidad de unidades de andesita y andesita basáltica, principalmente, con cantidades menores de riolitas, dacitas y basaltos. No hay mayores diferencias de composición entre las rocas terciarias y las cuaternarias. El yacimiento geotérmico parece encontrarse por debajo de las rocas del Cuaternario (<1.47 Ma), mismas que actúan como sello. La evolución química de los magmas, con excepción de los que originaron los basaltos traquiandesíticos, parece haber ocurrido de manera predominante por procesos de cristalización fraccionada, pues las fases minerales de estas rocas se correlacionan con las tendencias observadas en los diagramas binarios de elementos mayores. La mayoría de estas rocas corresponden con el vulcanismo del CVM en el área.

## 6. Modelo estratigráfico-estructural

Finalmente, con la información proporcionada por los estudios de geología estructural, vulcanológico y de laboratorio, se realizó la interpretación de la estratigrafía de superficie y del subsuelo de la zona de estudio. Tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (monogénico) y la extensión que pueden tener sus productos, se formó un modelo estratigráfico estructural idealizado basado en la interpretación de correlaciones efectuadas entre las diferentes unidades encontradas que esquematiza el comportamiento de las fallas principales (Marítaro y Agua Fría), y de las secundarias como Laguna Verde, La Cumbre, El Chino, Laguna Larga, San Alejo, Puenteillas, Tejamaniles, El Vampiro y El Viejón. Además, el modelo toma en cuenta los datos

En la Tabla 1 se presenta un condensado de los resultados de los fechamientos realizados por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en rocas colectadas en el CVLA. Se reporta el resultado geocronométrico más satisfactorio para cada una de las muestras, con una incertidumbre de  $\pm 1$  sigma. Las edades de “cero” corresponden a muestras que sufrieron pérdidas importantes de argón por fenómenos naturales, por lo cual no son confiables. Las edades rejuvenecidas también perdieron argón, pero el dato reportado puede considerarse como una edad mínima, aunque estos valores deben tomarse con cautela. En general el método de fechamiento fue por roca total, aunque en algunas muestras se fecharon minerales específicos.

Por su parte, los estudios granulométricos ayudaron a correlacionar diferentes flujos piroclásticos encontrados en la región, y a definir su distribución en el mapa y su origen.

Los resultados de los estudios petrográficos y geocronométricos permiten delinear una estratigrafía del

superficiales (de cartografía volcánica y criterios vulcanológicos) para delinear aparatos volcánicos, derrames de lava, domos y conos monogenéticos. Este modelo se ilustra mediante la Figura 6 que incluye un plano regional con una columna litoestratigráfica compuesta, y dos secciones, A-A' y B-B', de dirección aproximada N-S.

Secuencia	Muestra	Edad de meseta (Ma)
<i>Mioceno</i>		
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-2876	>23.1 ± 3.5 (Edad mínima; rejuvenecida)
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-1600	19.62 ± 0.27
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-650	>18.3 ± 0.8 (Edad mínima; rejuvenecida)
Mil Cumbres (ignimbrita)	AZV-0801	17.6 ± 0.2
Mil Cumbres (lava)	AZ-56-2495	16.83 ± 0.28
Santa Inés (lava)	AZV-0804	14.5 ± 0.2
Mil Cumbres (lava)	AZV-0802	7.0 ± 0.1
<i>Plioceno</i>		
Santa Inés (ignimbrita)	AZV-0803	4.7 ± 0.1
<i>Cuaternario</i>		
Andesítica	AZ-61-330	1.57 ± 0.06
Basáltica	AZ-54-505	1.47 ± 0.06
Tejamaniles	AZ-10-0	1.24 ± 0.05
Andesítica	AZ-32-0	1.23 ± 0.05
Dacítica	AZ-38-0 (samidino)	1.21 ± 0.04
Andesítica	AZ-EAZ1-500	1.16 ± 0.04
Riolítica	AZ-EAZ1-300	1.05 ± 0.06 (rejuvenecida)
Andesítica	AZ-58-310	0.97 ± 0.25
Andesítica	AZ-AND-0	0.69 ± 0.03
Andesítica	AZ-49-2495	0.41 ± 0.50 (edad no válida)
San Andrés	AZ-DAC-0	0.38 ± 0.06
Riolítica	AZ-23-1000	0.32 ± 0.03
Andesítica	AZ-55-1409	0.24 ± 0.04 (Cero)
Andesítica	AZ-54-1490	0.20 ± 0.08 (Cero)
Andesítica	AZ-44-3542	0.09 ± 0.13 (Cero)
Dacítica	AZ-35-1002	0.04 ± 0.04 (Cero)
Andesítica	AZ-58-972	0.02 ± 0.04 (Cero)
Basáltica	AZ-09-2588	Cero

Tabla 1. Resultados de fechamientos por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en rocas del campo de Los Azufres.

vertical en todas las unidades litológicas del campo, con rangos que van de 70° a 90°, siendo más constante en las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno de Mil Cumbres y de la Sierra de Santa Inés.

c) El fracturamiento más intenso se localiza en la Sierra de Santa Inés y le sigue el de la Sierra de Mil Cumbres, considerándose que ambas secuencias andesíticas son las rocas huésped del yacimiento geotérmico en el subsuelo de Los Azufres. En el campo geotérmico, el fracturamiento es más intenso en las fallas mayores, que son Marítaro y Agua Fría.

d) El fracturamiento y fallamiento que se observa en las riolitas de El Chino, El Gallo, Agua Fría y El Chinapo, no es representativo de las estructuras del yacimiento geotérmico en el subsuelo, el cual se aloja en unidades más antiguas (Mioceno-Plioceno) que han registrado más eventos de deformación. Por lo tanto, no es conveniente localizar futuros pozos que busquen atravesar esas estructuras a profundidad.

e) Los análisis petrográficos, químicos y granulométricos, en conjunto con los estudios geocronométricos y los trabajos de campo, han permitido un mayor detalle en la estratigrafía de los pozos analizados, y una mejor comprensión de la estructura del subsuelo, tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (predominantemente monogenético) del área.

El modelo fue concebido con base en la correlación de los pozos a lo largo de los perfiles A-A' y B-B' y en el conocimiento del tipo de vulcanismo en el área. La presencia de rocas pliocénicas se infiere con base en una edad pliocénica obtenida en superficie, pero el límite inferior del Plioceno se ha fusionado con el límite superior del Mioceno.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

a) Las direcciones del fracturamiento medido a nivel de meso-estructuras responden claramente al fracturamiento regional, observándose las mismas estructuras con tendencias NNO-SSE ó N-S, NE-SO y E-W, que corresponden con los principales sistemas de fallas y fracturas observados.

b) Las inclinaciones de las fracturas tienen un comportamiento semi-

vertical en todas las unidades litológicas del campo, con rangos que van de 70° a 90°, siendo más constante en las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno de Mil Cumbres y de la Sierra de Santa Inés.

c) El fracturamiento más intenso se localiza en la Sierra de Santa Inés y le sigue el de la Sierra de Mil Cumbres, considerándose que ambas secuencias andesíticas son las rocas huésped del yacimiento geotérmico en el subsuelo de Los Azufres. En el campo geotérmico, el fracturamiento es más intenso en las fallas mayores, que son Marítaro y Agua Fría.

d) El fracturamiento y fallamiento que se observa en las riolitas de El Chino, El Gallo, Agua Fría y El Chinapo, no es representativo de las estructuras del yacimiento geotérmico en el subsuelo, el cual se aloja en unidades más antiguas (Mioceno-Plioceno) que han registrado más eventos de deformación. Por lo tanto, no es conveniente localizar futuros pozos que busquen atravesar esas estructuras a profundidad.

e) Los análisis petrográficos, químicos y granulométricos, en conjunto con los estudios geocronométricos y los trabajos de campo, han permitido un mayor detalle en la estratigrafía de los pozos analizados, y una mejor comprensión de la estructura del subsuelo, tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (predominantemente monogenético) del área.

f) Por primera vez las secuencias litológicas cuaternarias han quedado relativamente bien definidas en el subsuelo, aunque no el contacto entre el Plioceno y el Mioceno del cual sólo se obtuvo una idea aproximada.

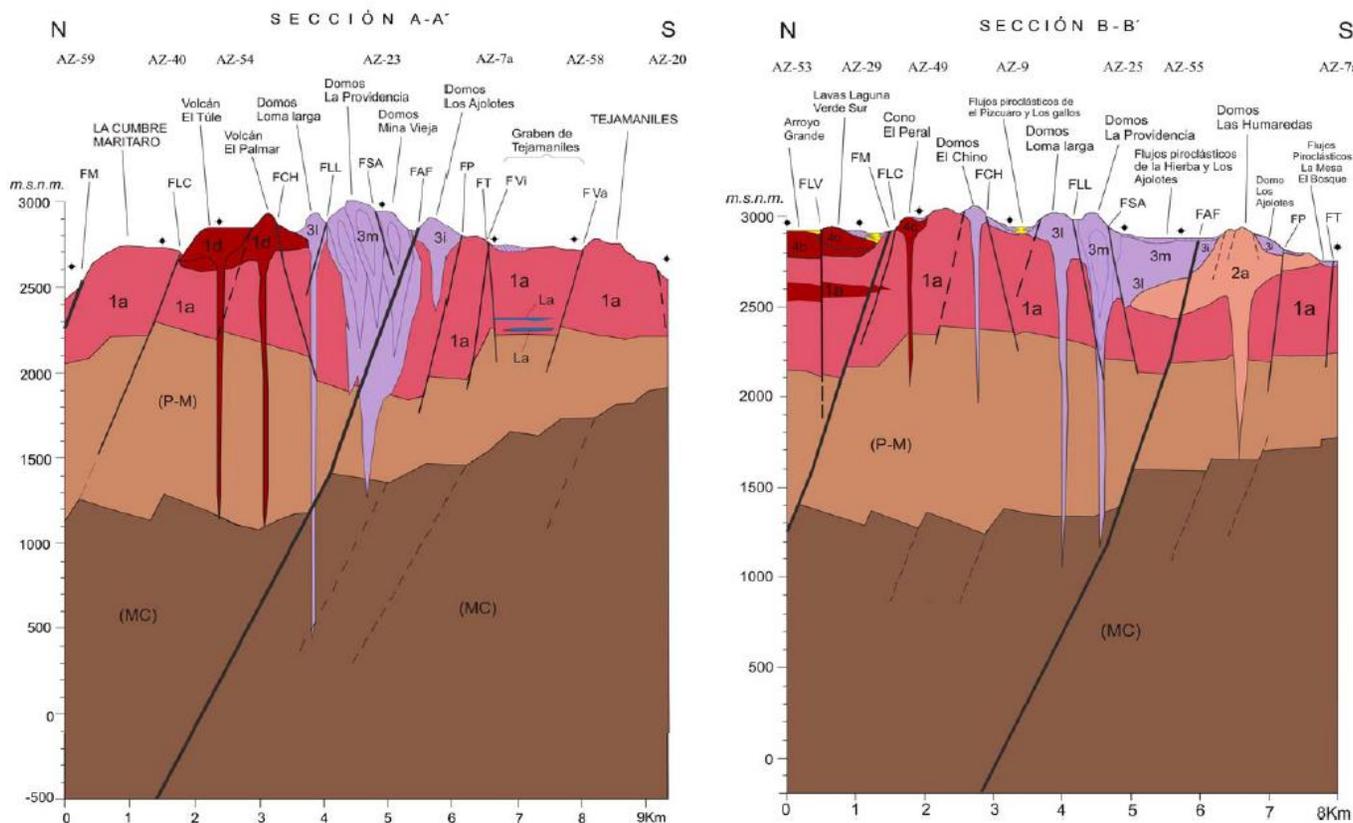
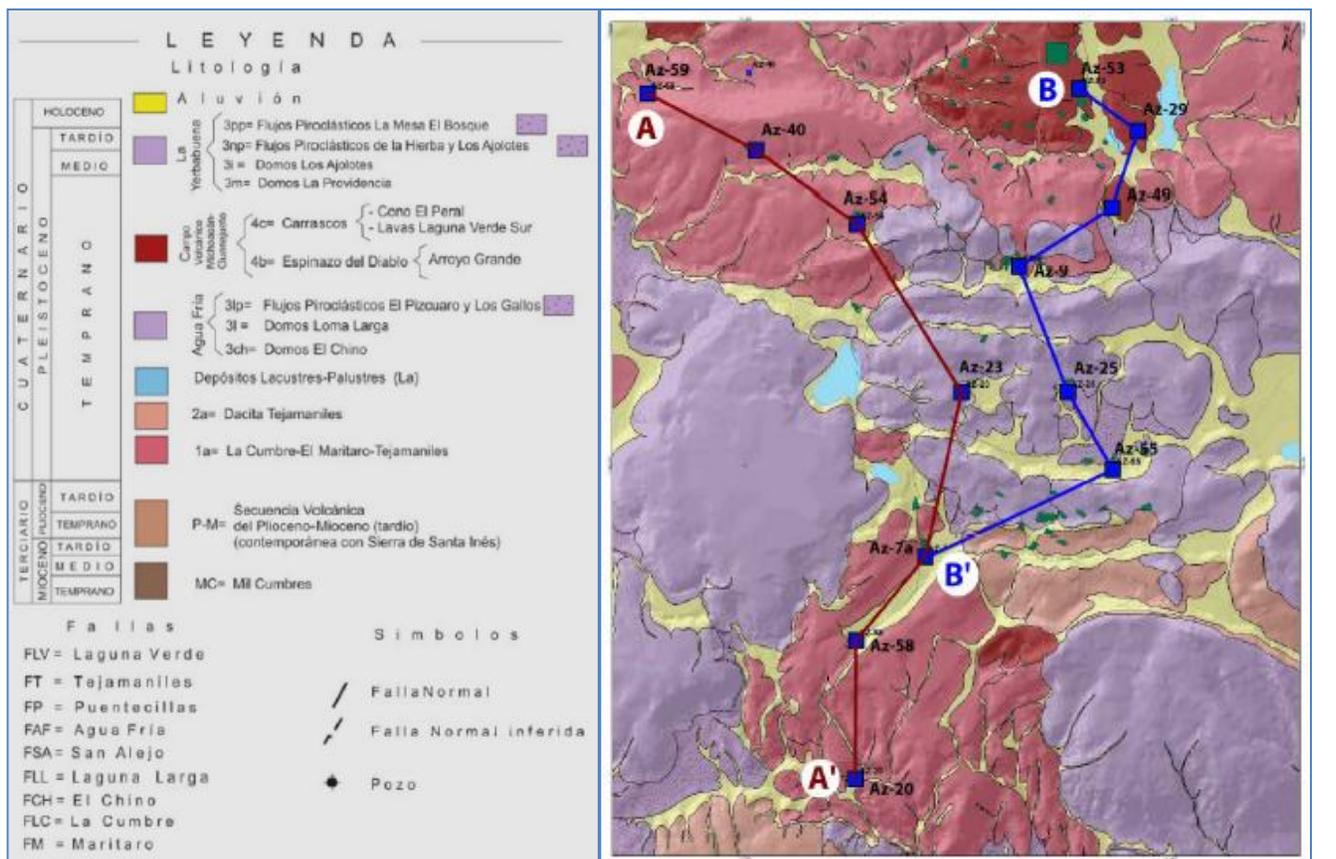


Fig. 6. Modelo litoestratigráfico, vulcanológico y estructural idealizado del Campo Volcánico de Los Azufres.

Las rocas cuaternarias alcanzan profundidades cercanas a los 500 m. Las rocas miocénicas comienzan a profundidades que varían desde unos 700 m en el sur, hasta cerca de 1200 m hacia el norte, debido a un fallamiento escalonado. Los resultados actuales parecen indicar que el yacimiento geotérmico se encuentra sellado por las rocas volcánicas cuaternarias.

g) Con base en lo anterior, se concluye que puede haber al menos dos zonas del yacimiento a profundidades diferentes. La primera puede variar entre 500 y 700 m, aproximadamente, y se atribuye al cambio litológico entre unidades del Cuaternario (1.47 Ma) y las rocas andesíticas del Plioceno (4.7 Ma). La segunda zona se debe al cambio litológico entre las rocas pliocénicas (4.7 Ma) y las miocénicas de la Sierra Mil Cumbres (23 a 17 Ma). Y aun podría existir una tercera zona del yacimiento, entre la discordancia o hiatus encontrado en rocas miocénicas con edades entre 17 y 14.5 Ma, pero como su límite no fue identificado con precisión ni se definió su continuidad en la región, no se puede identificar.

h) Es recomendable continuar estudiando el subsuelo de Los Azufres en la misma forma en que se realizó en este estudio, buscando en otros pozos muestras en las que se pueda encontrar la posible continuidad de la secuencia y/o definir mejor el hiatus y los probables límites del yacimiento geotérmico. Ello llevaría a obtener mejores resultados en la localización de futuros pozos productores e inyectores.

i) También se recomienda continuar actualizando los mapas en ArcGis, agregando nuevos datos estructurales y geológicos y la información que se vaya recopilando de nuevas zonas de estudio en el campo.

## Referencias

- Aumento, F., y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 1980. Geocronología de Los Azufres, Michoacán. Reporte interno de la CFE, No. 3-80, 66 p. Inédito.
- Camacho, F., 1979. Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán. Reporte interno de la CFE, s/n, 18 p. Inédito.
- Camacho, F., y M. Palacios N., 1979. Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán. Reporte Interno de la CFE No. 6-79, 42 p. Inédito.
- Campos-Enríquez, J.O., F. Domínguez-Méndez, M. Lozada-Zumaeta, H.F. Morales-Rodríguez and J.A. Andaverde-Arredondo, 2005. Application of the Gauss theorem to the study of silicic calderas: The calderas of La Primavera, Los Azufres, and Los Humeros (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 147, pp. 39-67.
- De la Cruz, V., J. Aguilar, D. Ortega, y J.M. Sandoval, 1982. Estudio geológico estructural a detalle del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Reporte interno de la CFE No. 9-82, 41 pp. Inédito.
- Demant, A., R. Mauvois, y L. Silva-Mora, 1975. *Estudio geológico de las hojas Morelia y Maravatío (1/100,000), Estado de Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México, 40 p.
- Demant, A., 1976. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, Vol. 2, No. 2, pp. 172-187.
- Dobson, P., and G.A. Mahood, 1985. Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 25, pp. 273-287.

- Ferrari, L., V.H. Garduño, G. Pasquaré, and A. Tibaldi, 1991. Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 47, pp. 129-148.
- Ferrari, L., V.H. Garduño, G. Pasquaré, and A. Tibaldi, 1993. The Los Azufres caldera, Mexico: the results of multiple nested collapses (Reply to a comment by Robin and Pradal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 56, pp. 345-349.
- Ferrari, L., M. López-Martínez, G. Aguirre-Díaz, and G. Carrasco-Nuñez, 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, No. 27, pp. 303-306.
- Garduño-Monroy, V.H., 1987. Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas del basamento relativo del campo geotérmico de los Azufres. Reporte interno de la CFE No. 20-87, 73 p. Inédito.
- Garfias, A., y A. González, 1978. Resultados de las exploraciones en la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán, México. Reporte interno de la CFE s/n, 42 p. Inédito.
- Garfias, A., y Z. Casarrubias, 1979. Resumen geológico del pozo Azufres No. 5. Reporte interno de la CFE s/n, 15 p. Inédito.
- López-Hernández, A., 1991. Análisis estructural del campo de Los Azufres, Mich. Interpretación de datos estructurales y del subsuelo. Informe interno de CFE No. 11-91, 137 p. Inédito.
- Pradal, E., et C. Robin, 1985. Découverte d'une caldera majeure associée au champ géothermique de Los Azufres (Mexique). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 132 (Sér. II), pp. 135-142.
- Pasquaré, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Tibaldi, and L. Vezzoli, 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart Series*, MCH072, 22 p.
- Robin, C., and E. Pradal, 1993. The Los Azufres caldera, Mexico—Comment on the paper by Ferrari et al., — An attempt to understand the volcanic structure—. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 56, pp. 339-344.
- Silva-Mora, L., 1979. Contribution a la connaissance de l'Axe volcanique Transmexican: étude géologique et pétrologie des lavas du Michoacán oriental: Thèse du Troisième Cycle, Univ. de Aix-Marseille III, France, 146 p. Inédito.

# **Foro**

Sección con artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos de los artículos técnicos usuales y que no han sido sometidos a arbitraje técnico.

## El Congreso Geotérmico Mundial 2010 y la Declaración de Bali

*Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

Del 25 al 30 de abril de 2010 se llevó a cabo el Congreso Geotérmico Mundial (*World Geothermal Congress*) en el Centro Internacional de Convenciones (BICC: *Bali International Convention Center*) de Bali, Indonesia. Este congreso es convocado y organizado por la Asociación Geotérmica Internacional (IGA: *International Geothermal Association*) cada cinco años. El primero de ellos se realizó en Florencia, Italia, en 1995, y le siguieron los congresos del año 2000 en Kyushu-Tohoku, Japón, y del 2005 en Antalya, Turquía. En esta ocasión, el congreso fue copatrocinado por la Asociación Geotérmica Indonesia (INAGA: *Indonesian Geothermal Association*).



*Vista de la exposición comercial en el BICC*

El BICC se localiza en el área de Nusa Dua de la isla de Bali, donde se ubican también los mejores y más conocidos hoteles y centros turísticos del país. Fue construido en 1991, incluye un auditorio principal con capacidad para 2500 personas y otras 17 salas de reunión, un área para exposiciones y un área comercial. Como parte del congreso, se montó una exhibición de equipos, instrumentos y servicios relacionados con la geotermia, con 81 módulos ocupados por diversas compañías e instituciones indonesias e internacionales como Aecom, Alstom, Baker Hughes,

Chevron, Cryostar, EDC, Halliburton, Medco Energy, Mitsubishi, Ormat, Pertamina, PT PLN, Star Energy, ThermoChem, Toshiba, el Ministerio Indonesio de Energía y Recursos Minerales y otros. Los delegados tuvieron acceso gratuito a servicios de internet inalámbrico en todo el BICC, y pudieron disponer de unas 25 computadoras también con acceso a internet sin ningún cargo.

El congreso fue precedido por cinco cursos cortos realizados entre el 22 y 25 de abril en Bali y en Jakarta, la capital de Indonesia: Perforación, terminación y pruebas de pozos geotérmicos, coordinado por Pierre Ungemach (Francia); Diseño, construcción y operación de plantas geotermoeléctricas, coordinado por Richard Campbell (EUA); Bombas de calor geotérmico, coordinado por John Lund (EUA); Financiamiento de proyectos geotérmicos, coordinado por Gordon Bloomquist (EUA); e Introducción a la energía geotérmica, coordinado por Sayogi Sudarman y Yunus Daud (Indonesia). De acuerdo con el reporte de Ronald Horne, copresidente del Comité Técnico del congreso, hubo 244 asistentes de varios países a estos cinco cursos.

El lema del congreso fue “Geotermia: energía para cambiar al mundo” (*Geothermal: energy to change the world*). Como explicó Gordon Bloomquist, copresidente del Comité Supervisor del congreso, este lema se escogió porque los organizadores creen “sinceramente que la geotermia no sólo juega un rol importante y siempre creciente para contribuir a satisfacer la futura demanda mundial de energía de una manera ambientalmente responsable, sino que puede y debe jugar un rol aun mayor en la mejora social de buena parte del mundo... la energía geotérmica realmente puede cambiar al mundo y convertirlo en un mejor lugar para vivir”.

Se registraron alrededor de 2500 asistentes de 85 países, 190 de los cuales recibieron apoyo completo o parcial mediante el programa de patrocinios (*fellowships*) del congreso. Los comités de finanzas y de patrocinio lograron reunir una bolsa de 233 mil dólares por parte de la Universidad de las Naciones Unidas en Islandia, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EUA, la Asociación Geotérmica de Nueva Zelanda, la propia IGA, varias compañías privadas y un donador anónimo. El comité de patrocinio había recibido 350 solicitudes de apoyo, por lo que finalmente pudo resolver poco más de la mitad de esas solicitudes y apoyar a esos 190 participantes de 49 países diferentes. Entre ellos, China, Indonesia, Irán, Kenia, México, Filipinas, Rusia y Turquía fueron los países con más de 10 delegados patrocinados total o parcialmente en cada uno de ellos.



Aspecto de la ceremonia de inauguración del congreso.

El Comité Técnico recibió inicialmente 1450 resúmenes de trabajos sometidos a su consideración, 1039 de los cuales fueron finalmente terminados y enviados. De ellos el comité seleccionó 652 (el 63%) para ser presentados oralmente en alguna de las 131 sesiones técnicas en las que se dividió el congreso, así como otros 285 trabajos (el 27%) para presentarse en la sesión tipo póster que se llevó a cabo el 28 de abril de las 3:30 a las 5:10 de la tarde. Los resúmenes iniciales y los trabajos en extenso fueron revisados por 140 especialistas en los 40 temas técnicos en los que se dividieron las ponencias. Adicionalmente, hubo un equipo de 11 personas de la Universidad de Stanford, EUA, encargado de la edición gramatical final de los trabajos en extenso.

El 25 de abril fue el día oficial de registro, y por la noche se ofreció una recepción de bienvenida a los asistentes en los jardines del hotel Westin, adyacente al BICC, que incluyó música de percusión y danzas *barong* y *kecak* típicas de Indonesia. El 26 por la mañana tuvo lugar la ceremonia de inauguración, que contó con la participación de los presidentes de Indonesia, Dr. H. Susilo Bambang Yudhoyono, y de Islandia, Ólafur Ragnar Grímsson, además del presidente de la IGA, Dr. Ladislaus Rybach, del presidente del comité organizador, Dr. Herman Darnel Ibrahim, y del presidente de la INAGA, Dr. Surya Darma, entre otros funcionarios. El presidente de Indonesia golpeó el tradicional gong para declarar oficialmente inaugurado el congreso, y se presentaron después varias conferencias plenarias, incluyendo una por parte del presidente islandés. Éste, ingeniero de profesión, indicó en su ponencia que la geotermia ha ayudado a paliar la bancarrota financiera de Islandia gracias al reducido costo de la calefacción y electricidad de origen geotérmico que satisface la tercera parte de la demanda total de la isla.



*Típica danza kecak durante la fiesta de bienvenida.*

El 27 de abril se organizó una noche cultural indonesia, patrocinada por el Ministerio de Cultura y Turismo, en el parque *Garuda Wishnu Kencana* ubicado en el poblado de Ungasan, en la porción sur de Bali. El parque, con una impresionante vista al océano, tiene como principal atracción un par de estatuas en bronce, una con la cabeza de Garuda, el águila mítica que conduce a Wishnu, y otra con el busto de este mismo dios balinés de la vida y de la paz. Ambas estatuas son parte de una enorme estatua en construcción que, cuando concluya, tendrá 75 metros de altura y 60 metros de ancho, con 4 mil toneladas de peso, que será la mayor estatua del mundo, aun más alta que la Estatua de la Libertad en Manhattan. Wishnu (Visnú) es el principal dios hindú. Y es que aunque Indonesia es

el país con la mayor concentración de musulmanes del mundo, la mayoría de la población balinesa profesa la religión hindú, lo que explica la gran cantidad de templos hindúes que funcionan regularmente en Bali.

El 30 de abril por la noche los organizadores despidieron a los participantes con una fiesta nocturna realizada en el restaurante D'Kapla en el área de Pecatu, Bali, que incluyó también música y danzas balinesas e indonesias. Por la tarde se había realizado la ceremonia de clausura, en las mismas instalaciones del BICC, en la que se presentó un video de Australia y Nueva Zelanda, que serán los países sede del próximo congreso mundial en 2015 a realizarse en el Centro de Convenciones y Exhibiciones de Melbourne. En esta ceremonia de clausura se leyó y aprobó la llamada Declaración de Bali, cuyo texto se reproduce a continuación (traducción del autor del original en inglés).

## **DECLARACIÓN DE BALI**

### **Energía geotérmica para cambiar al mundo**

Somos más de 2500 miembros de las comunidades geotérmicas del mundo representadas por 85 países reunidos en Bali, Indonesia, para el Congreso Geotérmico Mundial 2010. El congreso ha sido convocado por la Asociación Geotérmica Internacional (*IGA: International Geothermal Association*) y la Asociación Geotérmica de Indonesia (*INAGA: Indonesian Geothermal Association*). Indonesia es un país bendecido con fuentes naturales de energía abundantes y sustentables, incluyendo lo que probablemente son los mayores recursos geotérmicos del mundo listos para ser aprovechados. Considerando la larga historia del desarrollo de la energía geotérmica aquí en Indonesia y en el mundo entero, nos parece oportuno que nosotros, los participantes en este Congreso Geotérmico Mundial aquí reunidos, por este medio declaremos:

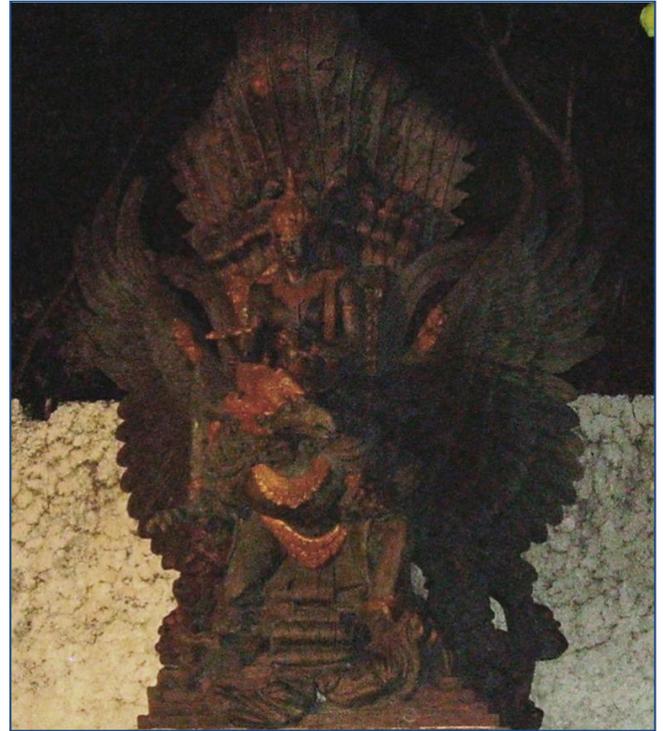
#### **PRIMERO. La energía es una necesidad humana básica y permanente.**

- a. La humanidad está aprendiendo a desarrollar tecnologías para manejar efectiva y eficientemente sus diversas necesidades de energía de una manera ambientalmente responsable.

- b. Los recursos naturales no deben considerarse sólo como una herencia de nuestros ancestros, sino como la herencia que se nos ha confiado para nuestros hijos y nietos.
- c. Sin energía no pueden desarrollarse otros recursos naturales, ni puede haber industrialización; la producción de alimentos siempre sería problemática, el desempleo seguiría siendo un problema mayor y los servicios serían extremadamente limitados.
- d. La energía geotérmica puede jugar un rol relevante cambiando significativamente esa situación, lo que se refleja en el lema del congreso: **Geotermia: energía para cambiar al mundo.**

## SEGUNDO. Se establece que

- a. El mundo requiere energía, ahora y siempre. La energía geotérmica es sumamente abundante.
- b. El cambio climático debe manejarse apropiadamente y la energía debe proporcionarse a un costo razonable para nuestra creciente población mundial.
- c. La energía geotérmica es local, sustentable y ambientalmente responsable, y contrarresta el calentamiento global desplazando el uso de energías que emiten carbono.
- d. La energía geotérmica puede generar electricidad además de sostener el desarrollo de una amplia variedad de usos directos, entre ellos la calefacción y enfriamiento de edificios, diversos procesos industriales y agrícolas, además de la balneología y desarrollos recreativos y terapéuticos.
- e. La energía geotérmica es la única fuente de energía renovable totalmente independiente de variaciones diarias, estacionales o climáticas, permitiéndole suministrar electricidad con una disponibilidad mayor que cualquier otra fuente de energía, incluyendo a los combustibles fósiles y a la energía nuclear.
- f. La tecnología para el uso de la energía geotérmica está bien desarrollada, aunque se sigue mejorando continuamente.
- g. Hasta la fecha, la energía geotérmica se ha desarrollado de una manera bastante limitada si se compara con su potencial energético. Dos de los principales factores limitantes son la obtención de financiamiento y las barreras legales, institucionales y regulatorias.
- h. Las tecnologías geotérmicas para explotar recursos de alta temperatura tienen costos nivelados competitivos con otras formas de energía. Esta competitividad de costos se ha ido extendiendo firmemente hacia recursos de temperatura más baja a medida que mejora la tecnología, pero en el extremo inferior de la escala de temperaturas aún se requieren políticas proactivas o incentivos para aumentar la competitividad de la geotermia.



*Estatua de Garuda y Wishnu en el parque Garuda Wishnu Kenkana.*

- i. La importancia de extender el uso de la energía geotérmica hacia temperaturas más bajas no radica sólo en que su base de recursos se incrementa exponencialmente a medida que la temperatura mínima se reduce, sino que la extensión geográfica donde puede utilizarse también se incrementa enormemente.

### TERCERO. Por lo tanto, los aquí reunidos llamamos a que



*Firma de la Declaración de Bali durante la ceremonia del clausura del Congreso Geotérmico Mundial 2010.*

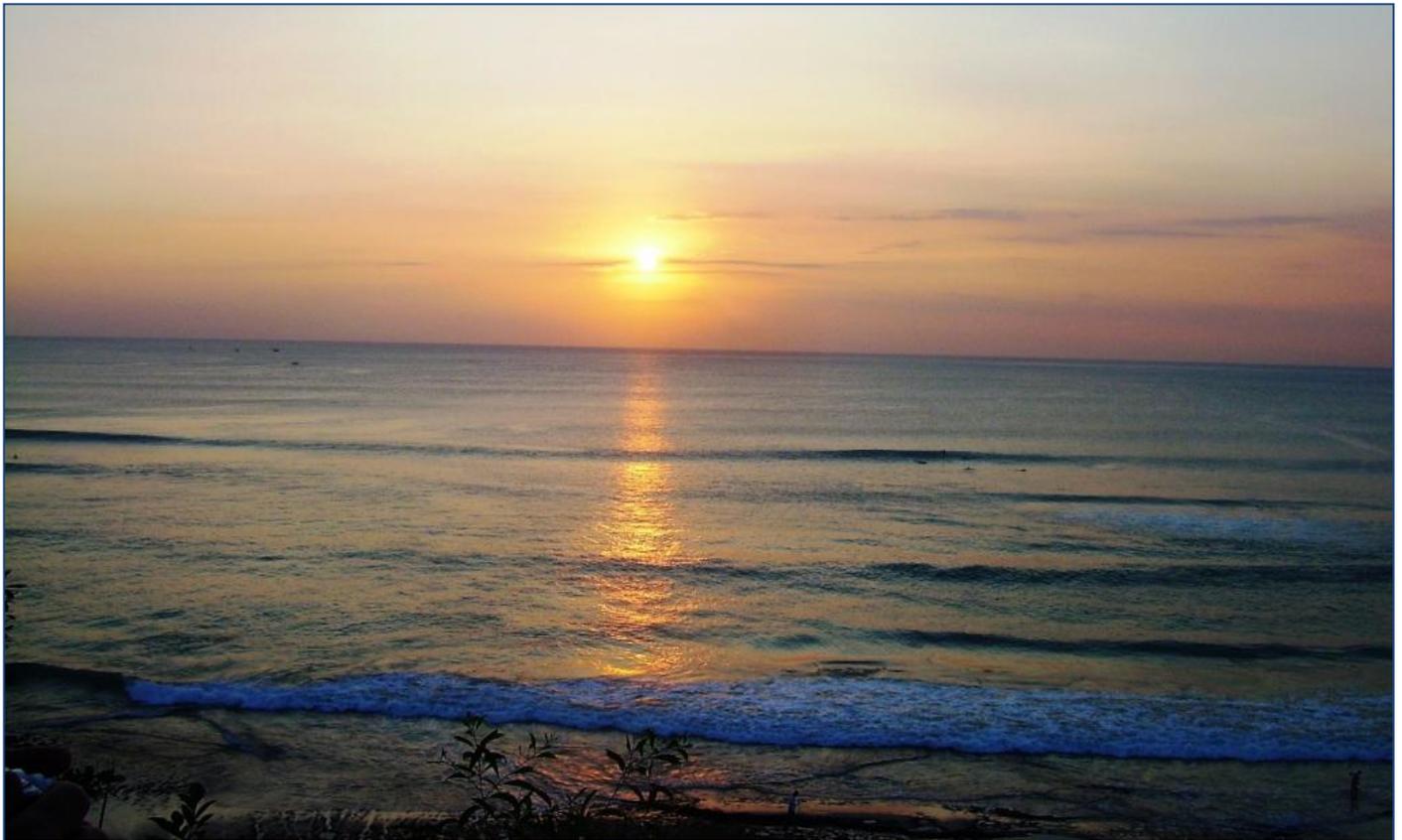
- a. Se asegure una mayor inversión en proyectos geotérmicos nacionales, regionales y locales, tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados y en las economías en transición. La mayor aceptación de la geotermia por parte de las agencias internacionales de cooperación puede jugar un papel preponderante.
- b. Se remuevan y reformen las barreras legislativas y administrativas.
- c. Los tecnócratas, políticos, líderes mundiales y quienes toman decisiones, tanto de países en desarrollo como desarrollados, se esfuercen por crear un clima político favorable para moldear una opinión pública conducente al desarrollo sustentable de la energía geotérmica. Por ejemplo, esto puede incluir apoyos gubernamentales en las áreas de seguros para reducir el riesgo, costos compartidos, garantías crediticias, y créditos sobre impuestos de producción.
- d. Se apoyen las inversiones en diversas formas (incentivos financieros del gobierno, créditos e inversiones de capital de los bancos, inversionistas privados, fondos de capital de riesgo) y se establezcan políticas para facilitar el acceso a todas estas fuentes.
- e. Se reconozca el importante rol de las compañías eléctricas existentes como receptoras de la generación eléctrica, que se adopten políticas de diversificación con energías renovables (*Renewable Portfolio Standards*), que se implementen del todo planeaciones integrales de recursos (*Integrated Resource Planning*) y que se disponga de contratos estándares de suministro incluyendo tarifas fijas o subsidiadas (*feed-in tariffs*).
- f. Se comprometa un financiamiento sustancial a la investigación y desarrollo para mejorar la competitividad de costos de generación de energía geotérmica, particularmente donde esto signifique que se pueda extender a nuevos escenarios, tales como bajas temperaturas y diferentes ambientes geológicos.
- g. Se facilite y apoye la transferencia del saber-cómo de países desarrollados hacia países en desarrollo, a través de una efectiva cooperación internacional entre gobiernos e instituciones académicas y

privadas, especialmente mediante el entrenamiento y educación conjunta, la construcción de capacidad y la asistencia técnica.

**CUARTO. Todo esto habrá de**

- a. Evitar emisiones adicionales de bióxido de carbono y reducir los niveles actuales de emisión;
- b. Crear oportunidades de empleo, aumentar el desarrollo industrial y la producción agrícola y mejorar el nivel de vida de los ciudadanos del mundo;
- c. Asegurar un suministro de energía adecuado y ambientalmente responsable para las generaciones venideras; y, por último pero no al último
- d. Lograr que la “energía geotérmica cambie al mundo” alcanzando un ambiente sustentable, pacífico, saludable y limpio en el mundo que vivimos, y consecuentemente una prosperidad duradera para toda la gente.

Nusa Dua, Bali, Indonesia, 30 de abril de 2010.



*Atardecer en Nusa Dua durante la fiesta de despedida del congreso en el restaurante D'Kapla.*

## Nuevo libro sobre modelado de sistemas geotérmicos

*Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

---

**E**n abril de 2010 se publicó un nuevo libro sobre modelado numérico de sistemas geotérmicos (y de agua subterránea). Este nuevo libro, escrito en inglés, se titula “*Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems*” (Introducción al modelado numérico de sistemas geotérmicos y de agua subterránea), y se anuncia que presenta “los fundamentos del transporte de masa, energía y solutos en rocas poro-elásticas”. Está escrito por J. Bundschuh y M.C. Suárez-Arriaga, y fue publicado en Holanda por CRC Press, división del Taylor and Francis Group como parte de su serie Multiphysics Modeling. Su registro ISBN es 978-0-415-40167-8.

Jochen Bundschuh es un investigador alemán del Instituto de Investigación Aplicada de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Karlsruhe, Alemania, y del Instituto Real de Tecnología (KTH) de Estocolmo, Suecia. Ha escrito al menos un par de libros relacionados con la geotermia como coautor de D. Chandrasekharam, uno de los cuales fue reseñado por Raffaele Cataldi en un número anterior de esta revista (Vol. 22, No. 2, Julio-Diciembre de 2009). Mario César Suárez-Arriaga es un investigador mexicano del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Ciencias de la Tierra de la Facultad de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, Mich., México. Suárez-Arriaga es también miembro fundador de la Asociación Geotérmica Mexicana y un reconocido experto en modelado geotérmico.

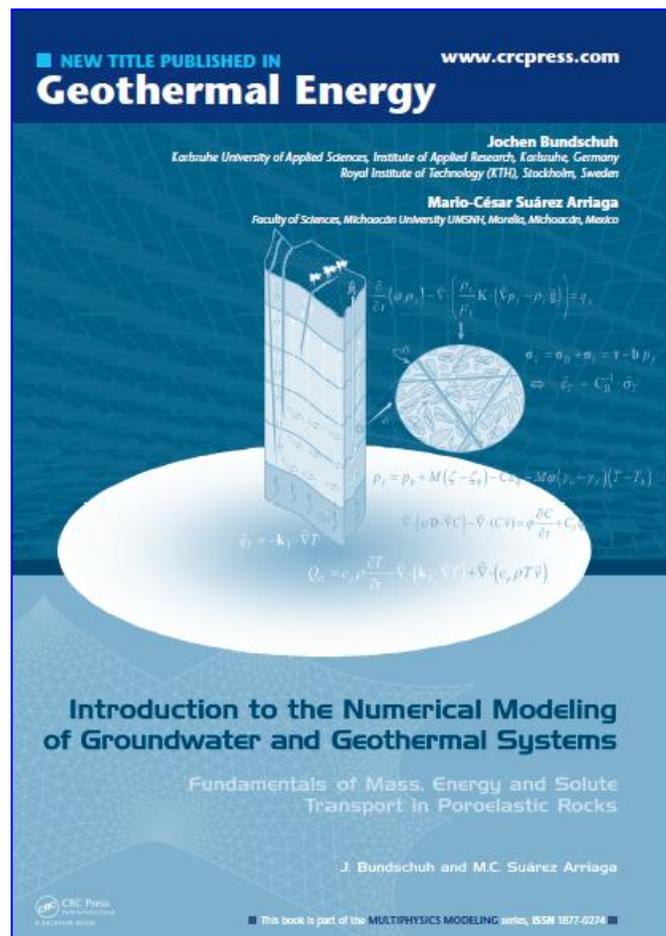
El libro presenta una introducción a los fundamentos de los sistemas geotérmicos y de agua subterránea. Explica los diversos problemas relativos a la energía y al agua contenida en rocas porosas deformables desde un enfoque didáctico y simple. También incluye las herramientas matemáticas y numéricas, y la teoría subyacente, empleadas usualmente para modelar y resolver esos problemas. De esta manera, el lector puede obtener un conocimiento completo de las leyes físicas del flujo de fluidos en rocas que presentan un comportamiento termo-poro-elástico, así como de las ecuaciones diferenciales parciales que representan a esas leyes y los principales métodos numéricos. Esto le permite al lector hallar las soluciones aproximadas de los modelos matemáticos relacionados.

El libro explica cómo se pueden generar y resolver modelos específicos de utilidad. Su carácter introductorio se deriva del hecho de que describe los aspectos básicos de los sistemas geotérmicos y de agua subterránea en tres campos principales: matemáticas, física e ingeniería. Todas las leyes y ecuaciones que se presentan a lo largo del libro fueron cuidadosamente formuladas con base en principios fundamentales de la física, y por tanto el lector es capaz de comprender la importancia de las matemáticas aplicadas a los diferentes temas.

En el libro se presentan y resuelven modelos simples, incluyendo varios ejemplos. También se describen cuidadosamente las técnicas numéricas a utilizar en modelos más sofisticados y avanzados. En ambos casos se enfatiza la interpretación física de las ecuaciones y de los resultados matemáticos.

Se discuten los parámetros y coeficientes que aparecen en acuíferos de tipo isotérmico y geotérmico con base en explicaciones bien desarrolladas y en resultados experimentales documentados. Cuando el libro aborda yacimientos naturales formados por rocas poro-elásticas bajo cambios de presión y de temperatura, introduce gradualmente las leyes de la conservación de la masa, el momento y la energía, y particularmente las dos leyes termodinámicas.

También se presentan los coeficientes que soportan consideraciones teóricas, obtenidos a partir de resultados experimentales, desde un punto de vista práctico, incluyendo una breve descripción sobre cómo se miden en laboratorio tales coeficientes.



El libro expone algunas ideas relativamente nuevas, entre ellas:

- La formulación en cuatro dimensiones de la teoría poro-elástica lineal.
- La deducción de la matriz de ecuaciones termo-poro-elásticas en cuatro dimensiones utilizando los potenciales de Gibbs y Helmholtz.
- Un modelo para estimar el colapso de fallas y fracturas en rocas.
- Ejemplos directos de la termodinámica de rocas porosas.
- Valores numéricos y relaciones de coeficientes poro-elásticos.
- Correlaciones prácticas para acuíferos de baja entalpía y para yacimientos hidrotermales bifásicos.
- Una presentación gráfica de las propiedades del agua y algunos ejemplos de modelos de sistemas geotérmicos y de agua subterránea.

Este libro pretende constituir un compendio sinóptico de los fundamentos del transporte de fluidos, solutos y calor aplicable a todos los tipos de sistemas subterráneos, desde acuíferos someros hasta sistemas hidrotermales profundos. Como tal, seguramente

habrá de ser un útil libro de consulta para estudiantes de pregrado y de grado, postgraduados, geólogos, hidrogeólogos, geofísicos, ingenieros, matemáticos y otros profesionistas de las importantes áreas del agua subterránea y los recursos geotérmicos.

El contenido general del libro es el siguiente:

1. **Introducción:** Problemas del agua y la energía, la visión del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), modelado multi-físico, necesidades del modelado en el contexto socio-económico, la importancia del modelado numérico.
2. **Propiedades de rocas y fluidos:** Propiedades de las rocas porosas, deformación linear termo-poro-elástica incluyendo el coeficiente de Biot-Willis, propiedades del agua.
3. **Propiedades especiales de acuíferos heterogéneos:** El concepto de porosidad múltiple, el concepto de triple porosidad-permeabilidad en sistemas geotérmicos, parámetros promedio, modelos generales de mezcla, aplicaciones de datos de campo, discontinuidad de parámetros en interfaces, propiedades petrofísicas de campos geotérmicos mexicanos (Los Azufres, Los Humeros y Cerritos Colorados) como ejemplos de acuíferos heterogéneos no isotérmicos.
4. **Flujo de fluidos, transporte de calor y de solutos:** Conservación de la masa de los fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes, ley de Darcy, flujo hacia pozos en acuíferos homogéneos, fundamentos

de pruebas de bombeo, ecuaciones de transporte de calor, flujo en yacimientos bifásicos, ecuaciones de transporte de solutos.

5. **Principales métodos numéricos:** Método de diferencias finitas, método de elemento finito (FEM) incluyendo la interpolación polinomial linear de Lagrange, la ecuación de Poisson y el método de Galerkin, método de volumen finito (FVM), método de elemento de límite para problemas elípticos, incluyendo la distribución de Dirac.
6. **Procedimiento para elaborar un método numérico:** Objetivos de métodos numéricos, modelos conceptuales, tipos y datos de campo necesarios para construirlos, formulación numérica, estimación de parámetros, selección del tipo de modelo y algoritmo (incluyendo los métodos ASM, SUTRA, TOUGH2, COMSOL Multiphysics, NODFLOW y STAR), análisis de sensibilización y calibración, simulaciones numéricas, evaluación de incertidumbres, fallos y errores, ejemplo de construcción de un modelo.
7. **Identificación de parámetros y problemas inversos** (capítulo escrito por Ángel Pérez y Longina Castellanos): planteamiento erróneo del problema inverso, mínimos cuadrados lineales (LLS), mínimos cuadrados no lineales (NLS), ejemplos de aplicación.
8. **Ejemplos de aplicación de modelado de agua subterránea:** Extracción de agua subterránea, intercambio de agua por infiltración, escenario de modelado de acuíferos con capas múltiples, punto de contaminación y remediación de la fuente, contaminación por boro, oscilaciones de la temperatura anual en un acuífero somero estratificado.
9. **Ejemplos de modelado de sistemas geotérmicos:** Energía geotérmica y características de los yacimientos geotérmicos mexicanos, conducción transitoria radial-vertical en pozos, modelo de Avdonin, salmuera geotérmica en yacimientos petrolíferos, potencial y modelado de sistemas geotérmicos submarinos, procesos de modelado en sistemas geotérmicos fracturados, incluyendo modelos de porosidad simple, doble y triple.

**Apéndices matemáticos:** Teorema de aproximación de Karl Weierstrass, interpolación polinomial de Lagrange, teorema integral de Stokes, teorema de Riemann, primera y segunda identidad de Green, teorema de divergencia, distribución de Dirac, tabla de Jochen.

Más información sobre este libro en el vínculo siguiente:

<http://www.crcpress.com/product/isbn/9780415401678>

### ***XVJJJ Congreso Anual (2010) de la Asociación Geotérmica Mexicana***

La AGM realizará su XVIII Congreso Anual y su XVIII Asamblea General el 8 de octubre de 2010 en las instalaciones de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Morelia, Mich., México. Visite el portal de la AGM para ver la convocatoria completa y demás detalles del evento en: <http://www.geotermia.org.mx>.

## El Mundo de la Energía

Información recopilada por Alfredo Mañón Mercado

### □ El fin de la era del petróleo

Analistas del Pentágono presentaron el informe *Joint Operating Environment 2010*, donde pronostican que el déficit del petróleo en el planeta y la lucha por los mercados harán que la vida futura parezca una película apocalíptica de Hollywood. Los expertos estadounidenses predicen un colapso a causa de la escasez de petróleo en el mundo. De acuerdo con el informe, para 2012 las reservas del combustible podrían agotarse y los precios serán incontrolables. En 2015 “la diferencia entre demanda y oferta podría ser de 10 millones de barriles diarios”.

Los cálculos del Pentágono no son únicos: según datos de la Universidad de Oxford, las reservas mundiales de petróleo están sobreestimadas al triple. La escasez del combustible llevará a una tensa lucha por los mercados parecida a las que ocurren en los filmes apocalípticos: con armamentos avanzados, cibernética y robots andróides que se usarán en guerras por el oro negro, lo que conducirá a serios riesgos geopolíticos.

Al mismo tiempo, los expertos insisten en que hay suficientes recursos energéticos pero no las plataformas necesarias para extraerlos, ni instalaciones suficientes para su refinación. El informe hace hincapié en las posibilidades del Mar Caspio, Brasil, Colombia y la plataforma continental de EUA para compensar el agotamiento de los yacimientos.

La extracción petrolera, al alcanzar su máximo, no se reducirá de manera paulatina sino que lo hará mediante saltos cualitativos, indica Colin Campbell, defensor de la teoría de la “punta de extracción” agregando que el límite máximo de los precios es 100 dólares por barril. Campbell predice que cuando la demanda haga que el costo se incremente más allá de este límite, comenzará la crisis.

Fuente:

[http://actualidad.rt.com/economia/sectores/issue\\_7546.html](http://actualidad.rt.com/economia/sectores/issue_7546.html).

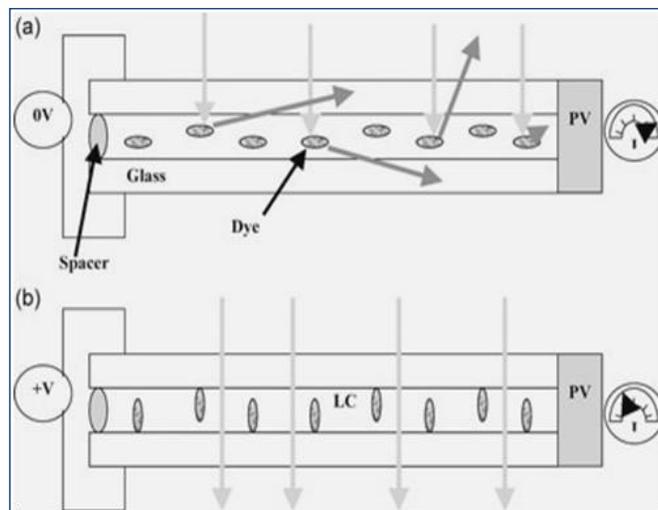
Más información:

<http://www.energybulletin.net/node/52029>,

[http://www.jfcom.mil/newslink/storyarchive/2010/JOE\\_2010\\_o.pdf](http://www.jfcom.mil/newslink/storyarchive/2010/JOE_2010_o.pdf)

### □ Ventanas inteligentes para generar energía

Las ventanas o vidrios “inteligentes” se refieren a tecnologías del vidrio que incluyen adminículos electro-crómicos, dispositivos de partículas suspendidas, micro-persianas y dispositivos de cristal líquido. Su principal característica es que pueden controlar la cantidad de luz que pasa a través del vidrio y aumentar la eficiencia energética del cuarto al reducir costos de calefacción y acondicionamiento de aire.



Principio de trabajo de la ventana inteligente propuesta. a) En estado apagado, b) Encendido al aplicar un voltaje externo.

En el caso de ventanas inteligentes auto-abastecidas, el vidrio incluso genera la energía requerida para cambiar eléctricamente su transparencia. Un nuevo tipo de ventana inteligente propuesta por investigadores

holandeses utiliza una solución luminiscente de cristal líquido barnizada con un tinte y colocada entre dos placas conductoras como una ventana generadora de energía.

El tinte absorbe una cantidad variable de luz dependiendo de su orientación y la re-emite, y una fracción significativa de la luz queda atrapada por la reflexión interna total en la interfaz vidrio-aire. Utilizando los paneles de vidrio como conductores de onda, la luz podría ser transferida hacia los bordes donde una celda solar adjunta la convertiría en electricidad. Hay emisión de luz en ambos estados (encendido o apagado), con la emisión máxima correspondiendo al estado de consumo mínimo de energía del aparato.

Más información:

<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=16258.php>.

#### □ **Algas y física cuántica**

Un nuevo estudio sugiere que algunas algas unicelulares simples se valen para su supervivencia de un fenómeno de la física cuántica que les permite aprovechar y convertir la energía solar con una enorme eficiencia. El estudio proporciona nuevos conocimientos sobre el proceso de fotosíntesis que utilizan las algas y plantas verdes para aprovechar la energía del sol, lo que podría ayudar al desarrollo de celdas solares orgánicas y otros dispositivos electrónicos que utilizan la luz, tales como láseres y pantallas.

Los resultados del estudio sugieren que las algas son, para efectos prácticos, computadoras cuánticas en miniatura. Dominan tan bien el proceso de la fotosíntesis que pueden convertir la luz solar en energía eléctrica con una eficiencia casi perfecta. Esto lo consiguen manteniendo “cableadas” entre sí a las proteínas que aprovechan la luz. Y ese cableado virtual se basa en un fenómeno conocido como coherencia cuántica, que les permite transferir energía de una proteína a otra a una velocidad ultrarrápida, y reducir así la pérdida de energía en la conversión energética.

Para que estas algas unicelulares puedan prosperar bajo condiciones de iluminación pobre en hábitats

marinos y de agua dulce, deben ser increíblemente eficientes en capturar toda la energía solar y convertirla en energía química mediante la fotosíntesis. Como no pueden permitir que escape la energía solar alguna, han desarrollado complejos sistemas de antenas que atrapan la luz.

Fuente:

<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/220310d.html>

Información adicional en:

<http://www.scitech-news.com/2010/02/how-algae-mastered-quantum-physics.html>,

<http://www.sciencedaily.com/.../02/100203131356.htm>.

#### □ **Bacteria modificada para generar combustible de la biomasa**

En un proyecto de colaboración dirigido por investigadores del Instituto Conjunto de BioEnergía se ha conseguido desarrollar un microbio que puede producir un biocombustible



avanzado directamente de la biomasa.

Los investigadores del proyecto han modificado una cepa de la bacteria *Escherichia coli* (E. coli) para producir biodiesel y otros productos químicos importantes derivados de los ácidos grasos. Esto puede reducir notablemente los costos de producción y hacer más viable el uso generalizado de este tipo de combustible.

Estudios científicos han mostrado de forma reiterada que los combustibles líquidos obtenidos de la biomasa vegetal serían una de las mejores alternativas si se encontrara una manera económicamente factible de llevar a cabo su producción comercial. El grupo está trabajando ahora para maximizar la eficiencia y la velocidad a la que su cepa de E. coli modificada genéticamente puede convertir directamente la biomasa en biodiesel. También está investigando las maneras

de maximizar la cantidad total de biocombustible que puede producirse en una única fermentación.

La productividad, el nivel de concentración y la conversión eficiente de la materia prima en combustible, son los tres factores más importantes para la viabilidad comercial de microbios modificados genéticamente para producir biocombustibles a escala industrial. Habrá que investigar mucho más todavía antes de que este proceso se vuelva comercialmente viable, pero el primer paso básico puede haberse dado ya con este estudio.

Fuente:

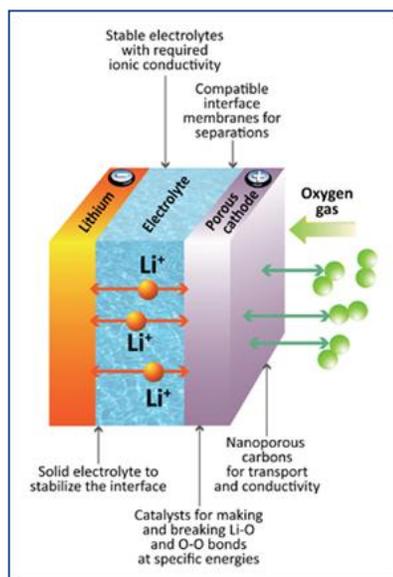
<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/100310d.html>.

Más información:

<http://www.scitech-news.com/2010/02/microbes-produce-fuels-directly-from.html>,

<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/01/100127144545.htm>

#### □ **Baterías de litio-aire**



Las baterías de litio-aire utilizan como catalizador un cátodo de aire que proporciona oxígeno, un electrolito y un ánodo de litio. Tienen el potencial de almacenar casi tanta energía como un tanque de gasolina, lo que resulta de cinco a diez veces mayor

que la capacidad de almacenamiento de baterías de iones de litio.

Investigadores del Laboratorio Nacional Argonne en EUA han desarrollado durante las últimas cuatro décadas varias modalidades de diseño de este tipo de baterías, y como resultado el laboratorio se ha colocado a la cabeza de la investigación en este campo.

Pero aunque el potencial de las baterías de litio-aire es enorme, la investigación necesaria para producir las comercialmente requiere resolver varios problemas y encontrar innovaciones en el campo de la ciencia de los materiales, la química y la ingeniería, lo que aún tomará tiempo.

Fuente:

<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/250110a.html>

Más información:

<http://www.scitech-news.com/2010/01/argonne-advanced-battery-research.html>,

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_air\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_air_battery)

#### □ **Otro mecanismo de conversión de energía solar en eléctrica**

Se ha descubierto un nuevo mecanismo por el cual puede ocurrir el efecto fotovoltaico en películas delgadas semiconductoras. Este nuevo método para la producción de energía eléctrica no presenta la limitación de las celdas solares convencionales de estado sólido.

Trabajando con una cerámica hecha de bismuto, hierro y oxígeno, que además presenta simultáneamente propiedades ferro-eléctricas y ferro-magnéticas, investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley de EUA descubrieron que el efecto fotovoltaico puede ocurrir espontáneamente en el ámbito nanométrico como resultado de una estructura cristalina distorsionada en ciertas cerámicas. También han demostrado que la aplicación de un campo eléctrico hace posible manipular esta estructura cristalina y por tanto controlar las propiedades fotovoltaicas.

Aplicando luz blanca a la cerámica se pueden generar foto-voltajes elevados dentro de áreas sub-microscópicas de entre uno y dos nanómetros. Consiguieron usar un pulso eléctrico de 200 volts para invertir la polaridad del efecto fotovoltaico o bien desactivarlo por completo. A la fecha no se ha documentado un control tan eficaz del efecto fotovoltaico en los sistemas fotovoltaicos convencionales, lo que sienta las bases para nuevas aplicaciones en la nano-óptica y la nano-electrónica.

Fuente:

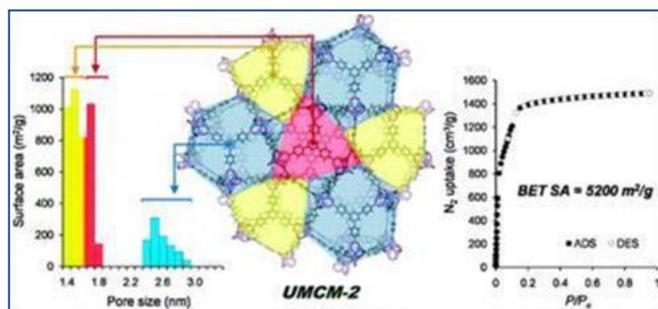
<http://www.amazings.com/ciencia/noticias/070510b.html>

Más información:

<http://www.scitech-news.com/2010/04/new-path-to-solar-energy-via-solid.html>

### □ Nuevo material superporoso

En un hallazgo que podría acelerar la producción de vehículos de celdas de combustible ultra-limpio propulsado por hidrógeno, científicos de La Universidad de Michigan, EUA, han desarrollado un nano-material esponjoso con una superficie récord para almacenar gases. Un solo un gramo de este material ocupa la superficie aproximada de un campo de fútbol.



Durante años se ha intentado encontrar un material para optimizar el almacenamiento de hidrógeno en vehículos futuristas a base de celdas de combustible. Pero a pesar de varios materiales promisorios, no ha sido posible cumplir con las metas de almacenamiento de hidrógeno propuestas por el Departamento de Energía de EUA (DOE) para vehículos de celdas de combustible de hidrógeno. El nuevo material, llamado UMCM-2 (*University of Michigan Crystalline Material*), consiste en nano-clústeres de óxido de zinc de espesor 50 mil veces menor que el de un cabello, unidos entre sí por materiales orgánicos para generar un marco sólido poroso, con una capacidad sin precedentes para absorber gases, lo que ahora puede ayudar a alcanzar el objetivo del DOE.

Fuente:

<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/04/090406102049.htm>

Más información:

<http://www.alternative-energy-news.info/new-sponge-like-gas-storage-material/>,

<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja809985t>

### □ Estudio sobre aerogeneradores de eje vertical

Como se sabe, los aerogeneradores convencionales de eje horizontal funcionan mejor si están suficientemente alejados entre sí. De otra manera los vórtices creados por uno pueden afectar al siguiente. Con un aerogenerador convencional se puede extraer un 50% de la energía del viento al que está expuesto, pero esta eficiencia se reduce mucho porque en un parque eólico hay que ponerlos separados unos de otros. Para asegurarse que el parque genere un 90% de la energía que generaría una sola turbina aislada, cada aerogenerador debe estar separado una distancia 10 veces superior al diámetro de la hélice. Para hélices que formen un rotor con un diámetro de 100 metros, por ejemplo, esa distancia debe de ser de 1 km.

Aerogeneradores menos habituales son los de eje vertical, de los cuales hay varios tipos. Estas turbinas recuerdan las cuchillas de las segadoras manuales de césped, pero con el eje de giro dispuesto verticalmente. Individualmente estos generadores son menos eficientes que los de eje horizontal, pero son mucho más efectivos cuando se sitúan unos junto a otros. Teniendo esto en cuenta, los parques eólicos podrían ser más pequeños que los actuales y aun así podrían proporcionar la misma potencia.

Robert Whittlesey y John Dabiri, ambos del MIT, han estudiado cuál es la mejor configuración de aerogeneradores de eje vertical que permita obtener el máximo rendimiento. Han trabajado junto a Daniel Weihs, un ingeniero que en los setenta demostró que los peces ahorran energía cuando nadan junto a otros en un cardumen, aprovechando los vórtices creados por los peces que van adelante. Esos investigadores se preguntaron si el espaciado relativo óptimo entre peces podría servir como plantilla para disponer las turbinas de eje vertical sobre una superficie.

Así que crearon un modelo computacional para comprobarlo.

Introdujeron distintas velocidades del viento como parámetros de entrada en el modelo y analizaron varias configuraciones de turbinas para definir la mejor.



Encontraron que una configuración de turbinas de giro en el sentido de las agujas del reloj alternadas con otras de giro contrario incrementaba significativamente la velocidad de giro de todas ellas. La razón, según ellos, es que la presencia de las turbinas vecinas concentra y acelera el viento. Esta configuración es como sigue: una turbina de un tipo delante de una línea de dos turbinas del tipo contrario seguidas de una línea de tres del primer tipo y así sucesivamente.

Lo asombroso es que este tipo de configuración parece ser capaz de producir 100 veces más potencia por unidad de área que la configuración típica de aerogeneradores convencionales. Esto haría a la energía eólica más atractiva para países con recursos eólicos pero poca extensión geográfica. Además creen que este sistema sería más seguro para las aves, pues tendría una apariencia más sólida y éstas no se aventurarían en su interior. Lo que aún no tienen definido, sin embargo, es si el costo total por energía eléctrica producida sería mayor o menor que el sistema tradicional o si al final se tiene más o menos tierra de cultivo. Por ello, ahora planean ahora realizar estudios de campo con aerogeneradores reales.

Fuente:

<http://neofronteras.com/?p=2912&print=1>

Más información:

<http://physicsworld.com/cws/article/news/40993>

#### □ **Tecnología de almacenamiento de energía con aire comprimido (CAES)**

Dos nuevos proyectos sobre almacenamiento de energía con aire comprimido (CAES: *Compressed Air Energy Storage*) se desarrollan actualmente en EUA. Uno es un proyecto de 300 MW que lleva a cabo Pacific Gas & Electric en California, y otro uno de 145 MW en Nueva York que tiene a su cargo New York State Electric & Gas, cuya localización precisa no se ha determinado aún. Ambos proyectos son apoyados con 60 millones de dólares del fondo público *American Reinvestment and Recovery Act* (ARRA). En los dos, se emplearán cavernas subterráneas para almacenar aire comprimido bombeado durante la noche, mismo que se libera durante el día para generar energía eléctrica. La tecnología CAES es sumamente útil para incrementar la disponibilidad de recursos intermitentes, como los eólicos, ya que usualmente en la noche suele haber buenas velocidades de viento, pero no hay mucha demanda de electricidad. Otra ventaja de esa tecnología es que satisface las necesidades de escala de la red. La mayoría de las tecnologías de almacenamiento por medio de baterías son capaces de almacenar tal vez uno dos megawatts, pero no los cientos de megawatts que la red requiere.

Actualmente en Estados Unidos funciona ya una única planta de tecnología CAES en McIntosh, Alabama, pero ya se han registrado diversas patentes comerciales incluso para la segunda generación de esta tecnología (CAES2), así como de la llamada aumento de generación (PA: *Power Augmentation*).

Más información:

<http://www.renewablesbiz.com/article/10/03/its-air>

#### □ **Próxima actividad solar potencialmente peligrosa**

El Sol está despertando de un letargo profundo y en los próximos años la actividad solar será mucho más intensa. La Academia Nacional de Ciencias de EUA alertó sobre esto desde hace un par años, apuntando que la sociedad actual depende de sistemas de alta tecnología para su vida diaria, como las redes de energía inteligentes, la navegación mediante GPS (sistemas de posicionamiento global), la aviación, los servicios financieros y las comunicaciones de emergencia

por radio, que pueden verse afectadas por la intensa actividad solar que se pronostica. La academia advirtió que una poderosa tormenta, del tipo de las que ocurren una vez al siglo, podría causar veinte veces más daño económico que el que provocó el Huracán Katrina en Estados Unidos.



Gran parte del daño puede ser mitigado si se toman medidas preventivas, por ejemplo poniendo a los satélites de comunicación en “modo seguro” y desconectando transformadores para protegerlos de descargas eléctricas dañinas.

Y aunque el pronóstico del clima espacial está en su etapa inicial, ha estado progresando últimamente gracias a sistemas como el Observatorio de Relaciones Terrestres y Solares (STEREO: *Solar Terrestrial Relations Observatory*). Este consiste en un par de naves espaciales estacionadas en lados opuestos del Sol, con un campo de visión combinado que cubre el 90% de la superficie estelar. Anteriormente a ellas

era posible que algunas manchas solares activas se escondieran en el lado lejano del Sol siendo invisibles desde la Tierra, y aparecieran de pronto provocando erupciones solares y CMEs (*Coronal Mass Ejections*). Por su parte, el Observatorio de Dinámica Solar (SDO: *Solar Dynamics Observatory*) es la más reciente incorporación a la flotilla de la NASA, lanzado en febrero de 2010, y puede fotografiar regiones activas del sol con resoluciones espectral, temporal y espacial mucho mejores que las que hasta ahora se han alcanzado. El SDO también monitorea la emisión solar de rayos en la banda extrema del ultravioleta, la cual controla la respuesta de la atmósfera terrestre a la variabilidad solar. Finalmente, otro satélite de la NASA, el Explorador Avanzado de Composición (ACE: *Advanced Composition Explorer*), se localiza entre el sol y la Tierra y detecta ráfagas de viento solar, CMEs de miles de millones de toneladas y tormentas de radiación, hasta 30 minutos antes de que lleguen a nuestro planeta. El ACE está considerado como el mejor sistema de alerta temprana, lo que permite notificar a los operadores de los servicios públicos y de satélites cuándo ocurrirá una tormenta.

Fuente:

[http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2010/04jun\\_swe\\_f.htm?list1351845](http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2010/04jun_swe_f.htm?list1351845)

Más información:

[http://www.nswp.gov/swef/swef\\_2010.html](http://www.nswp.gov/swef/swef_2010.html)

### ***Geothermal History***

***Geothermal History*** es una columna regular del Boletín del GRC (*Geothermal Resources Council*), coordinada por nuestra colaboradora Susan Hodgson, quien también es la editora de ese Boletín. Susan solicita permanentemente colaboraciones de todo el mundo. Si tiene alguna historia, anécdota o foto, relativa a la geotermia, compártala con la comunidad y envíele un mensaje a la dirección: [cosmos@dcn.org](mailto:cosmos@dcn.org).

## INSTRUCCIONES DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA GEOTERMIA

*Geotermia* está abierta a la participación de investigadores de instituciones tanto nacionales como del extranjero quienes deben dirigir sus contribuciones a:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

[l.g.negrin@gmail.com](mailto:l.g.negrin@gmail.com), [luis.quijano@geotermia.org.mx](mailto:luis.quijano@geotermia.org.mx), [luis.gutierrez@geotermia.org.mx](mailto:luis.gutierrez@geotermia.org.mx)

Los trabajos deberán cumplir con las siguientes instrucciones de publicación.

1. El artículo debe ser inédito y relacionado con la geotermia, las fuentes alternas no convencionales de energía o con ramas afines.
2. Enviar una copia impresa a doble espacio, así como disquete con el archivo en formato MS-Word. También puede enviarse el archivo por correo electrónico a las direcciones indicadas arriba. Se aceptan trabajos en español con resumen en inglés, o en inglés con resumen en español.
3. Las tablas, cuadros y figuras deberán incluirse al final del texto. Las figuras y gráficas pueden ser en color o en blanco y negro, tener buena calidad y no rebasar el tamaño carta. Su cantidad deberá ser la suficiente para la comprensión o ilustración del trabajo expuesto. Deberán incluirse en las copias impresas, al final del texto, así como en el disquete en forma de archivos independientes en formato de imagen (\*.gif, \*.tif, \*.jpg) que puedan importarse como tales desde MS-Word.
4. *Geotermia* es una revista virtual que se publica en formato \*.pdf en el portal interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y en otros portales públicos. Por lo tanto, es importante que todas las figuras y gráficas tengan la resolución suficiente para poder apreciarse al convertirse a archivos de imagen.
5. Todo artículo será sometido a revisión y arbitraje de un mínimo de dos especialistas en la materia. Para facilitar la imparcialidad de la revisión se mantendrá el anonimato entre autores y árbitros. Se enviarán reconocimientos escritos a quienes colaboraron como árbitros.
6. Se ofrecerá apoyo especial a los autores sin hábitos de publicar resultados por no constituir la publicación una parte rutinaria de su trabajo, y que, en consecuencia, requieran de indicaciones adicionales. El Consejo Editorial se encargará de hacer las modificaciones o correcciones pequeñas que no justifiquen la aplicación de un nuevo arbitraje.
7. El contenido de los trabajos deberá abordar los temas que se indican a continuación. Se subrayan las partes consideradas como indispensables, aunque su contenido pueda aparecer bajo otra sección o con otro título. Las otras secciones son opcionales, aunque pudiera haber otras a juicio del autor: Título, Autor, Adscripción laboral, Dirección de correo electrónico, Resumen en español, Palabras Clave en español, Título en inglés, Resumen (Abstract) en inglés, Palabras Clave (Keywords) en inglés, Antecedentes o Introducción, Objetivo, Metodología, Datos, Procesamiento, Interpretación, Interpretaciones alternativas, Conclusiones, Verificación, Agradecimientos, Referencias, Apéndices.
8. Todas las referencias deberán estar citadas en el texto y todas las citas deberán estar incluidas en las referencias. En el texto se empleará el sistema Harvard (apellido y año): "Algunos autores (González, 1995)...", o bien "González (1995) reporta que...". En caso de dos autores la cita deberá incluirlos a ambos (González y Rodríguez, 1995) y en caso de más autores deberá utilizarse la convención *et al.* (González *et al.*, 1995). La lista de referencias irá en orden alfabético y deberá incluir a todos los autores con todos los detalles de la publicación; si se emplean abreviaturas de publicaciones científicas, deberán estar de

acuerdo con el *World List of Scientific Periodicals*. Solamente las iniciales del primer autor irán después del apellido. El título de la revista o libro referenciado deberá escribirse en cursivas. Ejemplos:

Cedillo-Rodríguez, F., 1999. Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García, 1984. Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L., 1970. *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. Si lo desea, puede solicitar una copia de los formatos de arbitraje y utilizar como guía para el contenido de su contribución los artículos ya publicados en esta revista.

10. Eventualmente aparecerá como parte de la revista una sección intitulada FORO, la cual dará cabida a artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos precedentes, pero que a juicio del Consejo Editorial pueden resultar de interés para los lectores de la misma. Estas colaboraciones no serán sometidas a arbitraje técnico. Si desea que su colaboración sea considerada para publicarse en FORO, por favor indíquelo así al remitirla.

---

---

## DIRECTIONS FOR CONTRIBUTORS

*Geotermia* is open to Mexican and foreign contributors, who should send all contributions to:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

[l.g.negrin@gmail.com](mailto:l.g.negrin@gmail.com), [luis.quijano@geotermia.org.mx](mailto:luis.quijano@geotermia.org.mx), [luis.gutierrez@geotermia.org.mx](mailto:luis.gutierrez@geotermia.org.mx)

Contributions must follow these guidelines:

1. A submitted paper must be unpublished and related to geothermics, nonconventional energy sources or similar subjects.
2. Submit a printed copy, double spaced, and a diskette with the file in MS-Word format. The file may be sent by e-mail to an e-address indicated above. Contributions in Spanish with abstracts in English, or in English with abstracts in Spanish, are acceptable.
3. Tables, figures and graphs must be placed at the end of the text. They must be of good quality, either in color or black and white, and not larger than letter-sized paper. Include all tables, figures and graphs needed by a reader to understand the paper. Place them on the diskette as independent files in image-format (\*.gif, \*.tif, \*.jpg), which can be imported from MS-Word.
4. *Geotermia* is a digital magazine published in a \*.pdf format at the internal website of the Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos and at other public websites. Therefore, all figures and graphs must have enough resolution to be clear when they are converted to image-files.
5. All contributions will undergo review and arbitration by at least two specialists in the field. To encourage fair evaluations, the authors will receive anonymous reviews. The reviewers will receive an acknowledgement letter from the editorial board.

6. *Geotermia* offers special support to first-time authors for whom publishing papers is not part of their jobs. The editorial board can make small modifications or corrections to such papers without a new peer-review process.
7. All papers must include the following sections. Those considered as indispensable are underlined, yet they can be included under other chapters or subtitles. The other parts are optional, plus authors can include additional sections: Title, Author(s), Company or institution, Address, Abstract in Spanish, Keywords in Spanish, Title in English, Abstract in English, Keywords in English, Introduction or background, Objective, Methodology, Data, Processing, Interpretation, Alternative interpretations, Conclusions, Verification, Acknowledgement, References, Appendix.
8. All references must be cited in the text, and all citations must be included in the References. In the text, the Harvard citation system (last name and year) must be used: "Some authors (González, 1995)...", or: "González (1995) indicates that..." In the case of two authors, the citation must include both (González and Rodríguez, 1995), and in the case of more than two authors the convention *et al.* (González *et al.*, 1995) must be used. The list of references must be arranged alphabetically and include all the authors and details of the cited publication. All abbreviations must be from the *World List of Scientific Periodicals*. Initials of the first author must follow the last name. The title of a magazine or book must be written in italics. Examples:
 

Cedillo-Rodríguez, F., 1999. Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García, 1984. Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L., 1970. *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.
9. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geotermia* and use it as a guide for your contribution.
10. Eventually, a section named FORO will constitute the last part of the magazine. The section will include contributions, notes and essays that may or may not meet any or all of the stipulations for papers, but that the editorial board considers of interest to the readers. Contributions included in FORO will not undergo peer review. If you want a contribution be placed in FORO, please indicate this upon submission.